

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Асинхронный электропривод крановой тележки.

УДК 62-83-523:621.874.04

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г4Б1	Прокопьев Сергей Валерьевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин С.В.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Гуляев М.В.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

УТВЕРЖДАЮ:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ

_____ А.С. Ивашутенко

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г4Б1	Прокопьеву Сергею Валерьевичу

Тема работы:

Асинхронный электропривод крановой тележки.	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3483/с от 06.05.2019г

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Введение; описание технологического процесса; Выбор мощности двигателя, расчет параметров элементов и характеристик силовой цепи, расчет и построение механических и электромеханических характеристик системы ПЧ-АД, оптимизация контуров регулирования, тока, потокосцепления и скорости, разработка нелинейной модели САУ РЭП переменного

	тока с векторным управлением в среде Matlab, социальная ответственность проекта; финансовый менеджмент; заключение.
Перечень графического материала	<ul style="list-style-type: none"> - схема кинематическая механизма передвижения; - схема электрическая функциональная; - схема структурная короткозамкнутого асинхронного двигателя в неподвижной системе координат; - схема структурная динамической модели короткозамкнутого асинхронного двигателя во вращающейся системе координат; - схема имитационной модели короткозамкнутого асинхронного двигателя во вращающейся системе координат; - демонстрационный лист; - технико-экономические показатели;
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна
Социальная ответственность	Гуляев Милий Всеволодович
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	05.04.2019г.
---	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин С.В.	к.т.н.		05.04.2019г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5Г4Б1	Прокопьев Сергей Валерьевич		05.04.2019г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений

Период выполнения весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2019г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
23.05.2019	Основная часть	60
15.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
17.05.2019	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпушкин С.В.	к.т.н.		

СОГЛАСОВАНО:

И. о. руководителя ОЭЭ ИШЭ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 116 страниц, 50 рисунка, 2 таблиц, 22 источников.

Ключевые слова: электропривод тележкикозлового крана, преобразователь частоты, векторная система управления преобразователем частоты - асинхронный двигатель

В работе произведено описание работы козлового крана. Проведен расчет параметров элементов и характеристик силовой цепи, расчет и построение механических и электромеханических характеристик системы ПЧ-АД, оптимизация контуров регулирования, тока, потокосцепления и скорости, разработка нелинейной модели САУ РЭП переменного тока с векторным управлением в среде Matlab. Методом имитационного моделирования рассчитаны переходные процессы при пуске электропривода на холостом ходу и с максимальной нагрузкой тележки козлового крана.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе MicrosoftWord2010 и представлена на компакт диске (в конверте на обороте обложки). Также при работе использовались программы MatlabSimulink, MicrosoftVisio 2010 и MathCAD.

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 ОПИСАНИЕ КОЗЛОВОГО КРАНА.....	10
2 ОБЛАСТЬ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	15
2.1 Выбор электродвигателя. Расчет параметров	15
2.2. Расчёт параметров схемы замещения электродвигателя	18
2.3 Естественные механическая и электромеханическая характеристики двигателя	21
2.4 Определение области допустимой длительной работы двигателя	24
2.5 Построение требуемых областей длительной и кратковременной работы двигателя	27
2.5.1 Построение областей работы в плоскости механических характеристиках двигателя	27
2.5.2 Построение областей работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя.....	28
2.6 Выбор преобразователя частоты	30
2.7 Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель	35
2.7.1 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода.....	36
2.7.2 Расчет параметров механической системы	37
3 СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ САУ	38
3.1 Структурная схема линеаризованной САУ РЭП	38
3.2 Оптимизация контура тока.....	40
3.3 Оптимизация контура потокосцепления	47
3.4 Оптимизация контура скорости с ПИ– регулятором	53
3.5 Отработка контуром скорости возмущающих воздействий.....	61
4 НЕЛИНЕЙНАЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	65
4.1 Структурная схема нелинейной САУ РЭП асинхронного электропривода с векторным управлением	65
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	74
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	75
5.1 SWOT-анализ электропривода козлового крана ЛТ-62	75
5.2 Структура работ технического проекта	79
5.2.1. Структура работ в рамках технического проектирования.....	80
5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ	81
5.3 составление сметы технического проекта	84
5.3.1. Расчет материальных затрат	84
5.3.2 Полная заработная плата исполнителей	85
5.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)	86
5.3.4. Накладные расходы.....	87
5.4. Формирование сметы затрат технического проекта	87
4.5. Определение ресурсоэффективности проекта	88
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	91

6. Социальная ответственность	93
Введение	93
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	93
6.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства.....	93
6.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	94
6.2. Производственная безопасность.....	95
6.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов	95
6.2.1 Микроклимат рабочей зоны.....	95
6.2.2 Защита от шума и вибрации.....	96
6.2.3 Производственное освещение.....	97
6.3 Электробезопасность	98
6.3.1 Средства защиты от поражения электрическим током.....	100
6.3.2 Защитное заземление	100
6.4 Экологическая безопасность.....	101
6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	101
5.1.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС.....	101
5.1.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС.....	102
6.5.1 Пожарная безопасность	103
Заключение	105
Conclusion.....	107
Перечень использованных источников.....	108
Приложение А	110

ВВЕДЕНИЕ

Подъемно-транспортные машины (ПТМ) являются основным оборудованием для механизации работ в различных сферах ведения производственной деятельности: в промышленности, строительстве, на транспорте, в сельскохозяйственном производстве.

Козловой кран в упрощенном виде представляет собой мостовой кран, опирающийся на стойки и предназначенный для передвижения по наземному рельсовому пути. Внешне он напоминает четырехстоечный портал, от чего и получил свое название.

Козловой кран, прежде всего, предназначен для обслуживания складов, штучных, длинномерных и других грузов, полигонов по производству железобетонных, кирпичных изделий, открытых площадок промышленных предприятий, грузовых дворов, выполнения разгрузочных и погрузочных работ на контейнерных площадках морских портов и ж/д станций с температурой рабочей среды от -40 до + 40 градусов.

На морском транспорте козловые краны получили широкое распространение на перегрузке контейнеров, тяжеловесов, металла, лесных и строительных материалов, а также различных других навалочных грузов.

Козловые краны применяют для погрузочно-разгрузочных работ на открытых складах. Козловые краны общего назначения могут иметь грузоподъемность до 60 т и пролет до 34,5 м.

В козловых кранах, так же, как и в мостовых, реализуются три самостоятельные операции:

- подъем — опускание груза на требуемую высоту;
- перемещение груза вдоль моста крана поперек обслуживаемой площадки;
- перемещение груза краном вдоль обслуживаемой площадки.

Козловой кран представляет собой грузоподъемную конструкцию для выполнения разгрузочных и погрузочных работ. Данный тип кранов используют на открытых площадках промышленных предприятий, грузовых дворов, полигонов по производству железобетонных изделий и контейнерных площадках железнодорожных станций.

Козловые краны получили повсеместное широкое распространение, и их разработка является одной из важнейших в сфере подъемно-транспортных машин. Создание рациональных и оригинальных конструкций в значительной степени зависит от умения сочетать уже известные варианты техники и вводить новые, соответствующие высокому уровню современных требований.

1 ОПИСАНИЕ КОЗЛОВОГО КРАНА

Мост козлового крана представляет собой пространственную конструкцию, состоящую из двух, связанных между собой ферм. Однобалочные мосты более характерны для кранов грузоподъемностью 5-10 т. В качестве тележки в этом случае используют электротали. Козловые краны большой грузоподъемности выполняют с двухбалочными мостами. Рельсы для перемещения тележек в этих кранах обычно устанавливаются на верхней части главных балок. Грузовые канаты проходят между главными балками. Их повсеместно применяют для механизации погрузочно-разгрузочных работ на складах и полигонах заводов строительных изделий, на площадках укрупнительной сборки, монтаже строительных конструкций и технологического оборудования, при строительстве главных корпусов тепловых и атомных электростанций, укладке бетона в плотину гидроэлектростанций, монтаже оборудования доменных и цементных обжиговых печей и другого тяжелого промышленного оборудования. Козловые краны разделяют на монтажные и общего назначения. Краны общего назначения имеют грузоподъемность до 5 т, монтажные - до 500 т.

Основные параметры этих кранов:

1. Высота подъема - 4-25 м.;

2. Пролет - до 40 м.;
3. Скорость подъема груза - до 32 м/мин.;
4. Скорость передвижения крана - до 100 м/мин.;
5. Скорость передвижения тележки до – 40 м/мин.

Скорости всех механизмов козловых кранов являются рабочими.



Рисунок 1 - Козловой кран

Несущей конструкцией козлового крана является мост с двумя опорами. По мосту крана перемещается грузовая тележка с грузозахватным устройством. Опоры крана устанавливаются на ходовые тележки, каждая из которых перемещается по двурельсовому пути. Мосты кранов малой (до 5 т)

грузоподъемности изготавливают и в виде пространственной трехпоясной фермы и балки двутаврового профиля, по которой передвигается грузовая тележка. Мосты кранов средней и большой грузоподъемности выполняются в виде четырехпоясной решетчатой фермы прямоугольного или трапецеидального сечения. Грузовая тележка этих кранов может перемещаться по нижнему или верхнему поясу моста. Распространены комбинированные конструкции кранов, у которых по верхнему поясу перемещается грузовая тележка основного, а по нижнему - вспомогательного механизма меньшей грузоподъемности. Мосты кранов выполняются с консолями и без них. Длина консолей достигает 25...30% от длины пролета. В этой случае тележка вспомогательного подъема перемещается по всей длине пролетного строения

При переработке штучных и сыпучих материалов, поступающих на разгрузочную площадку водным путем, автомобильным транспортом или в других случаях, требующих увеличения площади, обслуживаемой краном, пролетное строение козловых кранов выполняется с одной или двумя консолями.

Высота этих кранов выбирается в зависимости от заданной высоты подъема груза, а также с учетом габаритов предметов и сооружений, над которыми надо переместить грузы – эстакады, железнодорожные подъездные пути с транспортом, штабеля материалов и т.д. В зависимости от профиля обслуживаемой площадки ходовые тележки могут быть расположены на одинаковых или разных уровнях. В некоторых случаях одна из ходовых тележек расположена на уровне пролетного строения. Такие краны называются полукозловыми.

Механизмы передвижения выполняют в виде одноколёсных или балансирных тележек, соединяемых с основанием стоек опор или ходовых балок. Приводные двигатели имеют фазный ротор; в козловых кранах с электроталями грузоподъёмностью 5 т и менее часто применяют короткозамкнутые двигатели. Балансирные тележки могут быть выполнены с установленными на промежуточные ходовые колёса зубчатыми венцами, связанными между собой колесом. Иногда на выходной вал редуктора

выполняют с третьей дополнительной опорой - с целью уменьшить нагрузку на корпус редуктора. В некоторых механизмах передвижения вал ведущего колеса монтируют на двух опорах и соединяют с редуктором зубчатой муфтой, однако это приводит к существенному увеличению ширины ходовой тележки. У механизма передвижения с навесным редуктором отсутствует консольная нагрузка и открытые передачи. Иногда валы редуктора и колёса соединяют с помощью жёсткой тарельчатой муфты. В козловых кранах применяются различные узлы установки ходовых колёс от мостовых кранов - цилиндрические и сварные буксы, закрепляемые внутри опоры. При использовании горизонтальных редукторов компоновка и рама усложняются; возрастают боковые габариты тележки. При использовании вертикальных редукторов значительно снижается масса и габариты тележки.

Большинство козловых кранов — самомонтирующиеся. Мост крана стреловым краном укладывают на шпальные клетки, одновременно устанавливая на рельсы ходовые тележки, стойки опор соединяют шарнирно с поясом моста и тележками, затем левые и правые стойки стягивают посредством лебедки и устанавливают кран в рабочее положение. Стойки опор внизу соединяют жесткими поперечинами (затяжками опор крана). Пролетное строение такого крана состоит из замкнутой листовой конструкции трапециидальной формы, грузовая тележка передвигается по рельсам, уложенным на боковых плоскостях пролетного строения.

В других конструкциях обе опорные ноги козловых кранов с пролетом до 30 м жестко соединяются с пролетным строением; с увеличением пролета одна нога проектируется пространственно жесткой (левая опора), а другая — плоской гибкой (правая опора). Такая схема исключает влияние на металлоконструкцию крана распора, который может возникнуть при действии повышенной температуры, вызывающей удлинение пролетного строения или при нарушении параллельности подкранового пути.

Механизмы подъема козловых кранов могут быть установлены на грузовой тележке или вынесены с нее. В первом случае грузовая тележка представляет собой обычную крановую тележку, несущую на себе механизм

подъема груза и механизм передвижения тележки, или специальную грузовую тележку. Часто для уменьшения веса и габаритов грузовой тележки механизмы подъема груза и передвижения тележки выносятся с грузовой тележки и устанавливаются над жесткой опорой. В этих случаях грузовая тележка несет на себе блоки полиспаста механизма подъема, а тяговое усилие от механизма передвижения к тележке передается с помощью тягового каната. С уменьшением веса и габарита тележки уменьшается нагрузка на пролетное строение, что позволяет снизить вес крана в целом.

Управление козловыми кранами обычно осуществляется из кабины, которая выполняется стационарной или подвижной. Подвижная кабина обеспечивает лучший обзор места погрузки и разгрузки, но создает дополнительную подвижную нагрузку на пролетное строение, что вызывает необходимость увеличения сечения пролетного строения. Стационарная кабина крепится к пролетному строению около жесткой ноги или непосредственно к опорной ноге, что позволяет уменьшить нагрузку на пролетное строение. Однако при больших пролетах значительно ухудшается обзор из кабины.

2 ОБЛАСТЬ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Область работы электропривода (рисунок 2) задана в 4-х квадрантах плоскости координат:

Область кратковременной работы ограничена максимальной скоростью электропривода $w_{\text{ЭПМАКС}} = 136 \text{ рад/с}$ и значением максимального момента электропривода в пуско-тормозных режимах $M_{\text{ЭП МАКС}} = 137 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

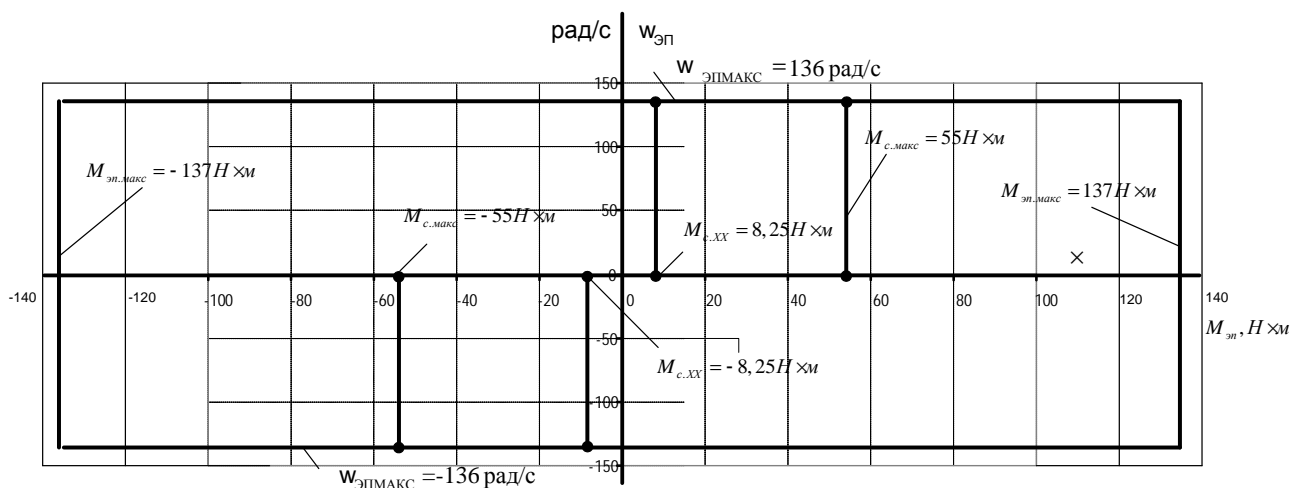


Рисунок 2 – Заданная область работы электропривода

2.1 Выбор электродвигателя. Расчет параметров

Расчет мощности электродвигателя тележки козлового крана производим по формуле [1]

$$P_{\text{дв.н}} = \frac{(m + Q) \times V \times 10^{-3}}{2,2 \times \eta} = \frac{(3000 + 30000) \times 40 \times 10^{-3}}{2,2 \times 0,72 \times 60} = 13,9 \text{ кВт},$$

где $Q = 30000 \text{ кг}$ - расчетная номинальная масса поднимаемого механизмом груза;

$m = 3000 \text{ кг}$ - масса тележки с двигателем и оснасткой;

$V = 40 \text{ м/мин}$ - линейная скорость горизонтального перемещения тележки с грузом;

$\eta = 0,72$ - КПД механизма передвижения тележки.

Номинальная скорость электродвигателя выбирается исходя из условия $\omega_{\text{двном}} < \omega_{\text{эпмакс}} = 136 \text{ рад/с}$, что требует регулирования скорости двигателя в первой зоне с постоянным потоком двигателя ($f_{\text{н}} \approx 50 \text{ Гц}$).

Мощность электродвигателя выбирается в соответствии с зависимостями длительно допустимого и кратковременно допустимого тока и момента или мощности двигателя в функции скорости.

Номинальная мощность электродвигателя выбирается в режиме длительной работы в соответствии со следующим условием $P_{\text{дв.н}} \leq P_{\text{двпотр}}$:

Выбираем электродвигатель общепромышленного назначения серии 4А160М4У3 мощностью 18,5 кВт [2].

Технические данные выбранного электродвигателя сведены в таблице 1, параметры схемы замещения – в таблице 1.

Таблица 1–Технические данные электродвигателя

Типоразмер	$n_0, \frac{\text{об}}{\text{мин}}$	$U_{\text{н}}, [\text{В}]$	$P_{\text{дв.н}}, [\text{кВт}]$	При номинальной нагрузке			$s_{\text{к}}, \%$	$J_{\text{дв}}, \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2}$
				$s_{\text{н}}, \%$	$\cos \varphi_{\text{н}}$	$\eta_{\text{н}}, \%$		
4А160М4У3	1500	380	18,5	2,2	0,88	89,5	16	0,13

Продолжение таблицы 1

$m_{\text{п}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{н}}}$	$m_{\text{к}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{н}}}$	$m_{\text{м}} = \frac{M_{\text{мин}}}{M_{\text{н}}}$	$k_{\text{идв}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{н}}}$	Степень защиты
1,4	2,3	1	7	IP44

Таблица 2 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R'_{1, \text{о.е.}}$	$X'_{1, \text{о.е.}}$	$X'_{m, \text{о.е.}}$	$R''_{2, \text{о.е.}}$	$X''_{2, \text{о.е.}}$
0,042	0.085	4,3	0.024	0,13

Определение дополнительных параметров двигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{p \times n_0}{30} = \frac{3,14 \times 500}{30} = 157,08 \text{ рад/с}.$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$n_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \times n_0 = (1 - 0,022) \times 500 = 1467 \text{ об/мин}.$$

или

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - s_{\text{н}}) \times \omega_0 = (1 - 0,022) \times 157,08 = 153,6 \text{ рад/с}.$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \times 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{18,5 \times 10^3}{153,6} = 120,4 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора. Для определения номинального фазного тока необходимо знать схему соединения обмоток статора. Если соединение обмоток неизвестно, то при расчете следует принять соединение Y.

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}.$$

Принимаем $U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В}$.

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \times U_{1\text{фн}} \times \cos \varphi_{\text{н}} \times \eta_{\text{н}}} = \frac{18,5 \times 10^3}{3 \times 220 \times 0,88 \times 0,895} = 35,6 \text{ А}.$$

Примечания:

$I_{1\text{лн}}$ – ток, потребляемый двигателем из сети в номинальном режиме работы.

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске

$$I_{1\text{макс}} = k_{\text{идв}} \times I_{1\text{лн}} = 7 \times 35,6 = 249,2 \text{ А}.$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_{\text{к}} = m_{\text{к}} \times M_{\text{двн}} = 2,3 \times 120,4 = 276,9 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске

$$M_{\text{ДВПУСК}} = m_{\text{П}} \times M_{\text{ДВН}} = 1,4 \times 20,4 = 168,6 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

2.2. Расчёт параметров схемы замещения электродвигателя

Производитель выбранных приводных двигателей серии 4А160М4У3 не указывает параметры схемы замещения, поэтому предварительно необходимо произвести расчет данных параметров.

Расчёт параметров схемы замещения в номинальном режиме

Расчёт параметров ведем для Т-образной схемы замещения электродвигателя. Схема замещения приведена на рисунке 3.

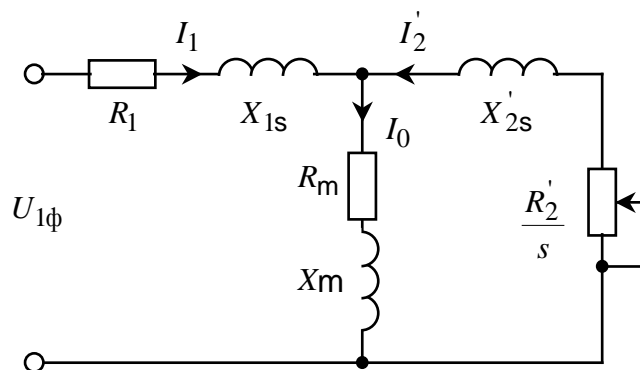


Рисунок 3 – Т – образная схема замещения асинхронного двигателя

Приведённое к обмотке статора сопротивление цепи ротора в номинальном режиме

$$R_{2\phi} = \frac{3 \times U_{1\phi}^2 \times (1 - s_n)}{2 \times m_k \times P_n \times c_1^2 \times \frac{1}{s_k} + \frac{1}{s_k} \times \frac{1}{\delta}} = \frac{3 \times 220^2 \times (1 - 0,022)}{2 \times 2,3 \times 8500 \times 1,023^2 \times \frac{1}{0,108} + \frac{1}{0,108} \times \frac{1}{\delta}} = 0,155 \text{ Ом},$$

где

$m_k = 2,3$ – кратность максимального момента;

$$c_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \times k_i \times I_{1H}} = 1 + \frac{11,543}{2 \times 7 \times 35,59} = 1,023$$

– коэффициент, характеризующий соотношение $\frac{X_m + X_{ls}}{X_m}$;

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p^*}^2 - \frac{e p^* \times (1 - s_H)}{e \cdot 1 - p^* \times s_H} \times I_{1H} \dot{U}}{1 - \frac{e p^* \times (1 - s_H)}{e \cdot 1 - p^* \times s_H} \dot{U}}} = \sqrt{\frac{27,634^2 - \frac{e 0,75 \times (1 - 0,022)}{e \cdot 1 - 0,75 \times 0,022} \times 35,59 \dot{U}}{1 - \frac{e 0,75 \times (1 - 0,022)}{e \cdot 1 - 0,75 \times 0,022} \dot{U}}} =$$

$$= 11,543 \text{ A}$$

– ток холостого хода;

$$I_{1p^*} = \frac{p^* \times P_H}{3 \times U_{1\Phi H} \times \cos j_{p^*} \times \eta_{p^*}} = \frac{0,75 \times 8500}{3 \times 220 \times 0,88 \times 0,895} = 27,634 \text{ A}$$

– ток обмотки статора при частичной загрузке двигателя $p^* = 0.75$;

$$s_k = s_H \times \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - \frac{e}{e} \cdot 2 \times s_H \times b \times (m_k - 1) \dot{U}}}{1 - 2 \times s_H \times b \times (m_k - 1)} =$$

$$= 0,022 \times \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - \frac{e}{e} \cdot 2 \times 0,022 \times 1 \times (2,3 - 1) \dot{U}}}{1 - 2 \times 0,022 \times 1 \times (2,3 - 1)} = 0,108$$

– критическое скольжение двигателя;

$b = 1$ – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора выбирается из диапазона (0,6 , 2,5).

Активное сопротивление обмотки статора в номинальном режиме работы

$$R_1 = R_2 \times b \times c_1 = 0,155 \times 1 \times 1,023 = 0,158 \text{ Ом}.$$

Сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме работы

$$X_{кн} = R_2 \times g \times c_1 = 0,155 \times 9,241 \times 1,023 = 0,329 \text{ Ом},$$

где

$$g = \sqrt{\frac{e}{e} \frac{1}{s_k} \frac{\dot{U}^2}{\dot{U}} - b^2} = \sqrt{\frac{e}{e} \frac{1}{0,108} \frac{\dot{U}^2}{\dot{U}} - 1} = 9,241$$

– коэффициент, характеризующий соотношение индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведённого активного сопротивления ротора.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в номинальном режиме работы

$$X_{1s} = 0,42 \times X_{\text{кн}} = 0,42 \times 1,464 = 0,615 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме работы

$$L_{1s} = \frac{X_{1s}}{2 \times p \times f_{1н}} = \frac{0,615}{2 \times 3,14 \times 50} = 1,96 \times 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Приведённое к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме работы

$$X_{2s} = 0,58 \times \frac{X_{\text{кн}}}{c_1} = 0,58 \times \frac{1,464}{1,023} = 0,83 \text{ Ом}.$$

Приведённая к обмотке статора индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоками рассеяния, в номинальном режиме работы

$$L_{2s} = \frac{X_{2s}}{2 \times p \times f_{1н}} = \frac{0,83}{2 \times 3,14 \times 50} = 2,64 \times 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания

$$X_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{205,318}{11,543} = 17,788 \text{ Ом},$$

где

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1\text{фн}} \times \cos j_{\text{н}} - I_{1н} \times R_1)^2 + (U_{1\text{фн}} \times \sin j_{\text{н}} - I_{1н} \times X_{1s})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \times 0,88 - 35,59 \times 0,158)^2 - (220 \times 0,475 - 35,59 \times 0,615)^2} = 205,717 \text{ В} \end{aligned}$$

– ЭДС ветви намагничивания, наведённая потоком воздушного зазора, в номинальном режиме;

$$\sin j_{\text{н}} = \sqrt{1 - (\cos j_{\text{н}})^2} = \sqrt{1 - 0,88^2} = 0,475.$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре

$$L_m = \frac{X_m}{2 \times p \times f_{1н}} = \frac{17,788}{2 \times 3,14 \times 50} = 56,65 \times 10^{-3} \text{ Гн}.$$

2.3 Естественные механическая и электромеханическая характеристики двигателя

Зная значения параметров схемы замещения и их зависимость от скольжения, можно с достаточной точностью рассчитать и построить механическую и электромеханическую характеристики двигателя.

Механическая характеристика двигателя представляет собой зависимость скорости двигателя от электромагнитного момента на валу двигателя $\omega(M)$. Однако расчетные значения момента двигателя соответствуют электромагнитному моменту. Поэтому расчетные механические характеристики двигателя представляют собой зависимость скорости вращения от электромагнитного момента $\omega(M_{эм})$. Электромеханическая характеристика двигателя представляет собой зависимость скорости $I_1(\omega)$ или скольжения $I_1(s)$ от величины тока статора. Естественные характеристики строятся при частоте инвертора $f_{и} = f_{1н} = 50$ Гц.

$$M(s) = \frac{3 \times U_{1фн}^2 \times R_2'(s)}{w_0 \times s \times [X_{1s}(s) + X_{2s}(s)]^2 + \frac{R_1'}{s} + \frac{R_2'(s)}{s} + \frac{R_1' \times R_2'(s)}{s \times X_{мн}}};$$

$$w = w_0 \times (1 - s).$$

Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя $I_1(w)$ с учетом эффекта вытеснения тока ротора и насыщения цепей потоков рассеяния рассчитывается по выражениям:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2(s) + I_2'^2(s) + 2 \times I_0(s) \times I_2'(s) \times \sin j_2(s)};$$

$$w = w_0 \times (1 - s),$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{\frac{R_1'}{s} + \frac{R_2'(s)}{s} + [X_{1s}(s) + X_{2s}'(s)]^2 + \frac{R_1' \times R_2'(s)}{s \times X_m}}};$$

$$I_0(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1s}(s) + X_m)^2}};$$

$$\sin j_2(s) = \frac{X_{1s}(s) + X_{2s}'(s)}{\sqrt{\frac{R_1'}{s} + \frac{R_2'(s)}{s} + [X_{1s}(s) + X_{2s}'(s)]^2}}.$$

Используя приложение MathCAD 14, рассчитываются и строятся естественные характеристики двигателя $\omega(M_{эм})$ и $I_1(\omega)$. В процессе расчета механической характеристики находятся расчетные значения критического скольжения s_K , электромагнитного номинального $M_{эмH} = M_{эм}(s_H)$, критического $M_{эмK}(s_K) = M_{эмK}$ моментов, соответствующие расчетной естественной механической характеристике двигателя. При расчете электромеханической характеристики находятся расчетные значения тока холостого хода I_0 , номинального $I_H = I_{1\phi H}$ тока двигателя.

Естественные расчетные механическая и электромеханическая характеристики двигателя приведены, соответственно, на рисунках 4 и 5.

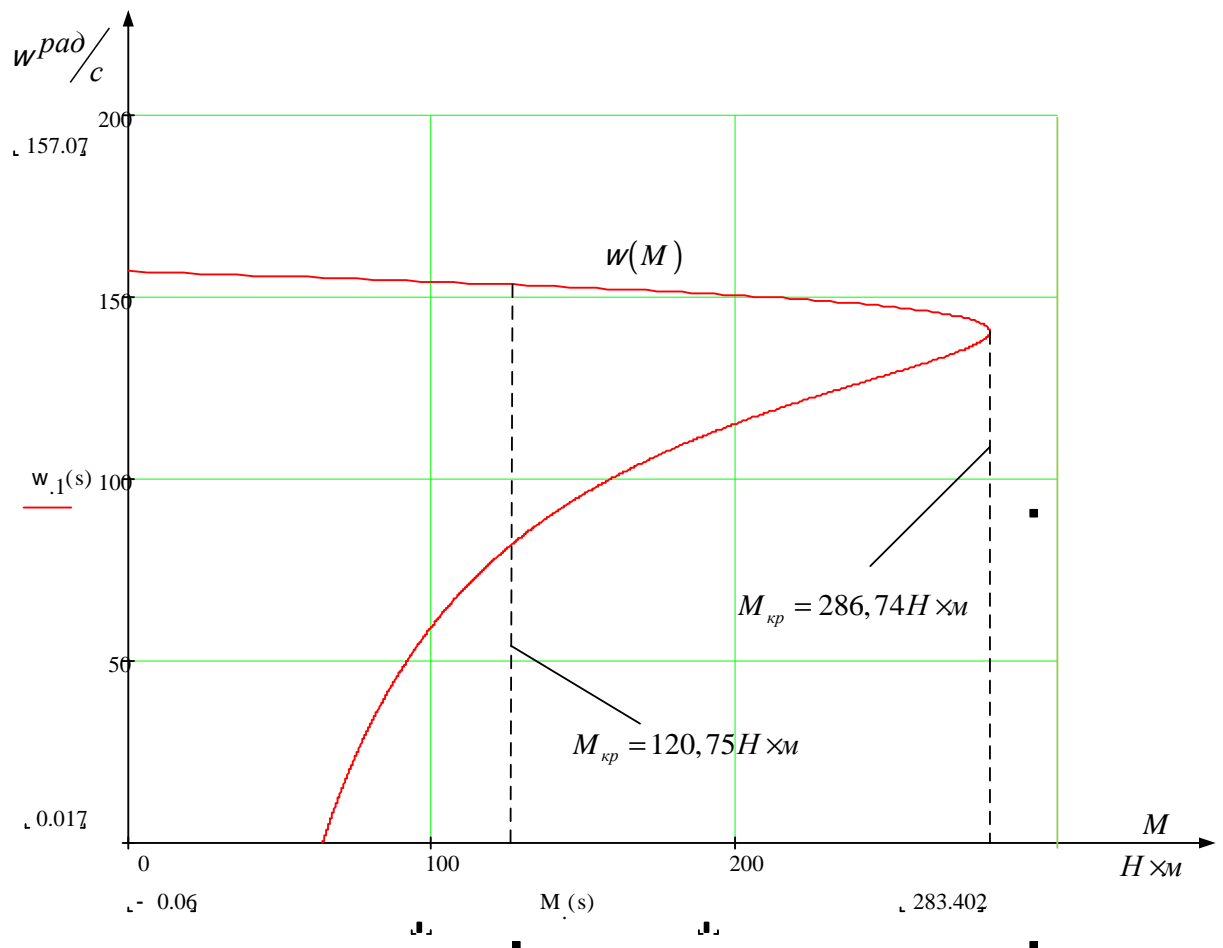


Рисунок 4 – Естественная механическая характеристика двигателя

По результатам расчета механической характеристики найдены значения электромагнитных моментов двигателя: номинального $M_{\text{эмн}} = 120,75 \text{ Н}\cdot\text{м}$; критического $M_{\text{эмк}} = 286,74 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при угловой скорости $\omega_k = 140,11 \text{ рад/с}$.

– кратность максимального (критического) момента

$$m_k = \frac{M_{\text{эмк}}}{M_{\text{эмн}}} = \frac{286,74}{120,75} = 2,37;$$

– критическое скольжение

$$s_k = \frac{\omega_0 - \omega_k}{\omega_0} = \frac{157,08 - 140,11}{157,08} = 0,108.$$

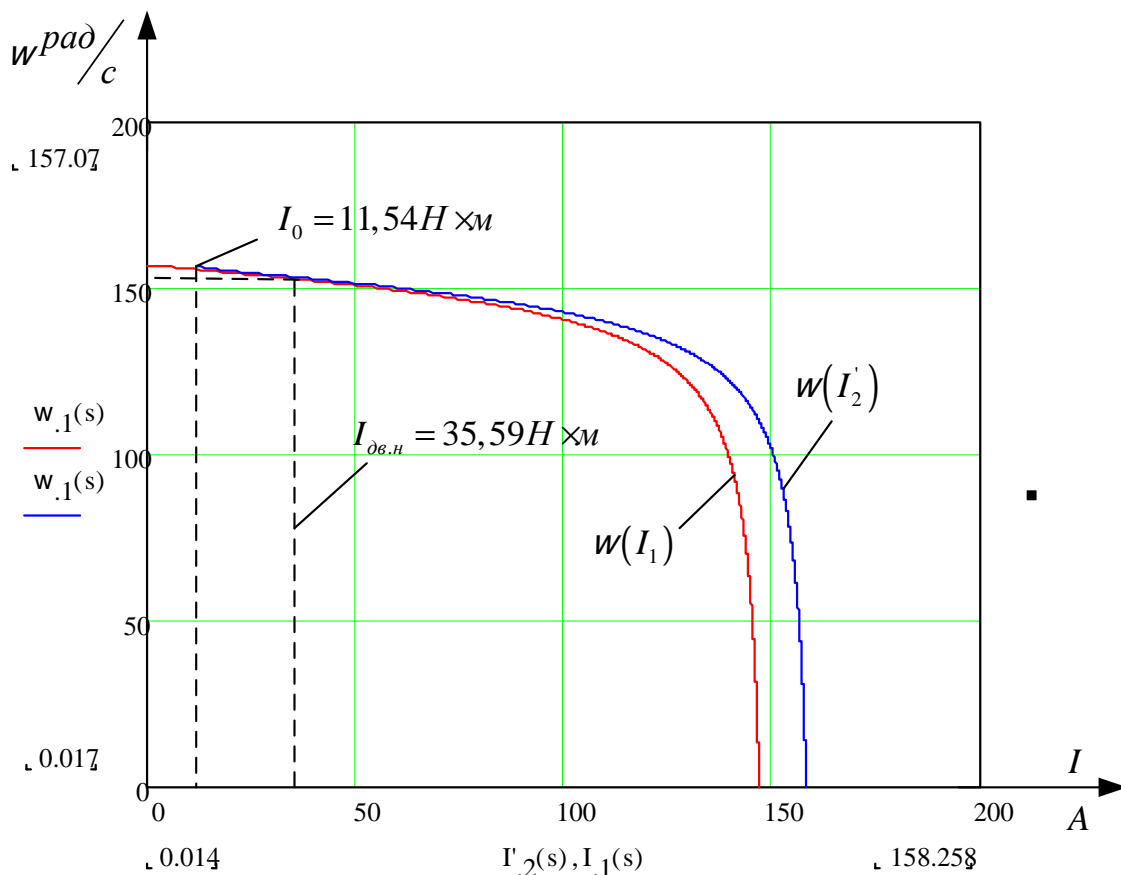


Рисунок 5 – Естественная электромеханическая характеристика двигателя

По результатам расчета электромеханической характеристики найдены значения тока холостого хода $I_0 = 11,54 \text{ A}$, номинального тока $I_n = 35,59 \text{ A}$.

Параметры расчетных механической и электромеханической характеристик двигателя оказались близки к приведённым в таблице 1 справочным параметрам двигателя.

2.4 Определение области допустимой длительной работы двигателя

Асинхронный двигатель питается и управляется от преобразователя частоты. При регулировании скорости будет использоваться способ векторного управления, что определяет поддержание постоянного потокосцепления двигателя при регулировании скорости ниже номинальной.

В соответствии с этим был выбран двигатель с независимой вентиляцией, что позволяет ему работать с нагрузками близкими к номинальным при низких скоростях работы электродвигателя.

Таким образом, перед выбором частотного преобразователя необходимо определить зону безопасной работы электродвигателя и задаться максимальными нагрузками.

В соответствии с техническими данными, предоставляемыми производителем, границы режима допустимой длительной работы двигателя при независимой вентиляции, можно представить в виде зависимостей:

– для тока двигателя

$$I_{\text{дв длит доп}}(\omega) = \begin{cases} I_{\text{дв н}} = 35,59 \text{ А, при } \omega^3 \geq 0,5 \omega_{\text{н}}^3 \\ 0,8 \times I_{\text{дв н}} = 0,8 \times 35,59 = 28,47 \text{ А, при } \omega = 0 \end{cases}$$

– для момента (электромагнитного) двигателя

$$M_{\text{эм длит доп}}(\omega) = \begin{cases} M_{\text{эм н}} = 120,75 \text{ Н}\cdot\text{м, при } \omega^3 \geq 0,5 \omega_{\text{н}}^3 \\ 0,8 \times M_{\text{эм н}} = 0,8 \times 120,75 = 96,6 \text{ Н}\cdot\text{м, при } \omega = 0 \end{cases}$$

В соответствии с приведенными зависимостями на механическую и электромеханическую характеристики наносим границы зон $M_{\text{эм длит доп}}(\omega)$ и $I_{\text{дв длит доп}}(\omega)$ длительной допустимой работы двигателя. Графики зависимостей приведены на рисунках 6 и 7.

Из приведённых на рисунках характеристик следует, что длительно допустимый момент нагрузки, с которым может работать двигатель на минимальной скорости $\omega_{\text{дв мин}} = 6,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ (диапазон регулирования скорости 1, 10), составляет $M_{\text{эм длит доп}} = 98 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при длительно допустимом токе статора $I_{\text{дв длит доп}} = 29 \text{ А}$.

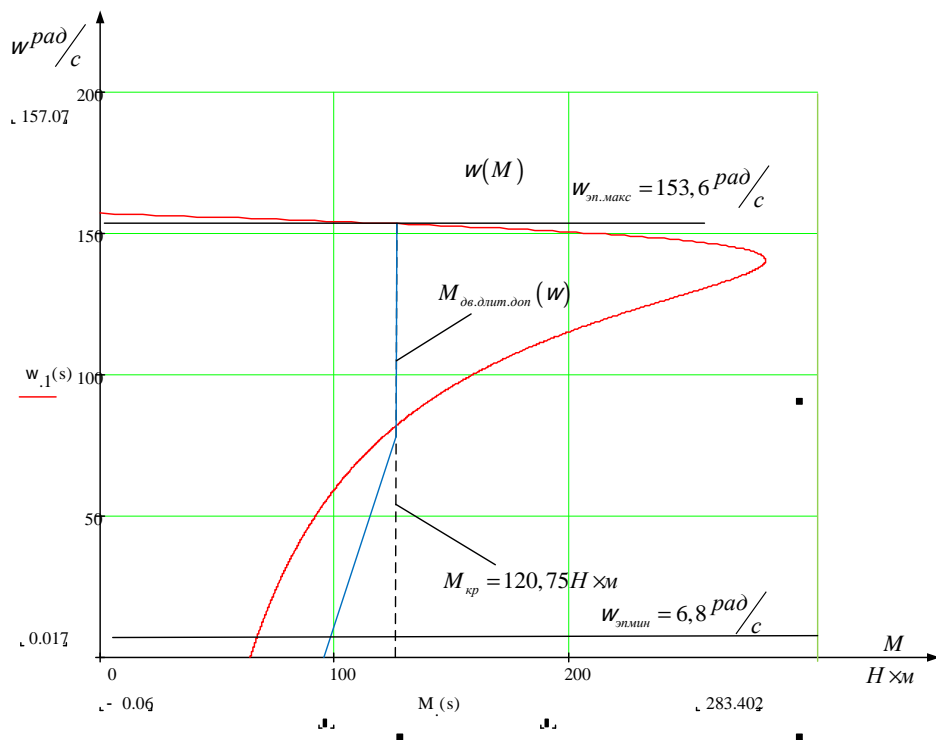


Рисунок 6 – Естественная механическая характеристика и граница области допустимой длительной работы $M_{\text{эм длит доп}}(\omega)$ двигателя

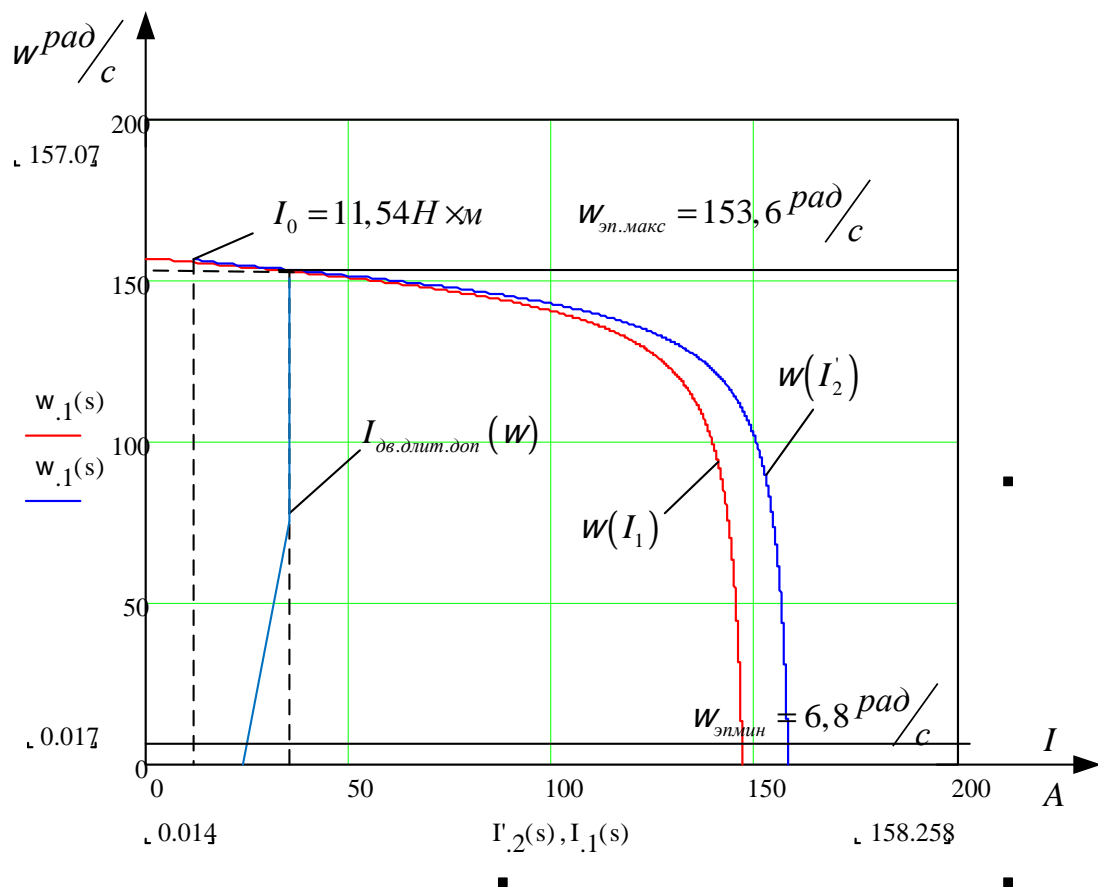


Рисунок 7 – Естественная электромеханическая характеристика и граница области допустимой длительной работы $I_{\text{дв длит доп}}(\omega)$ двигателя

2.5 Построение требуемых областей длительной и кратковременной работы двигателя

2.5.1 Построение областей работы в плоскости механических характеристиках двигателя

Статический момент, приложенный к валу двигателя

$$M_c = 55 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный требуемый момент электропривода в пусковом режиме.

$$M_{\text{эп макс}} = 137 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Найденные значения моментов нанесены на плоскость механических характеристик электродвигателя (рисунок 8).

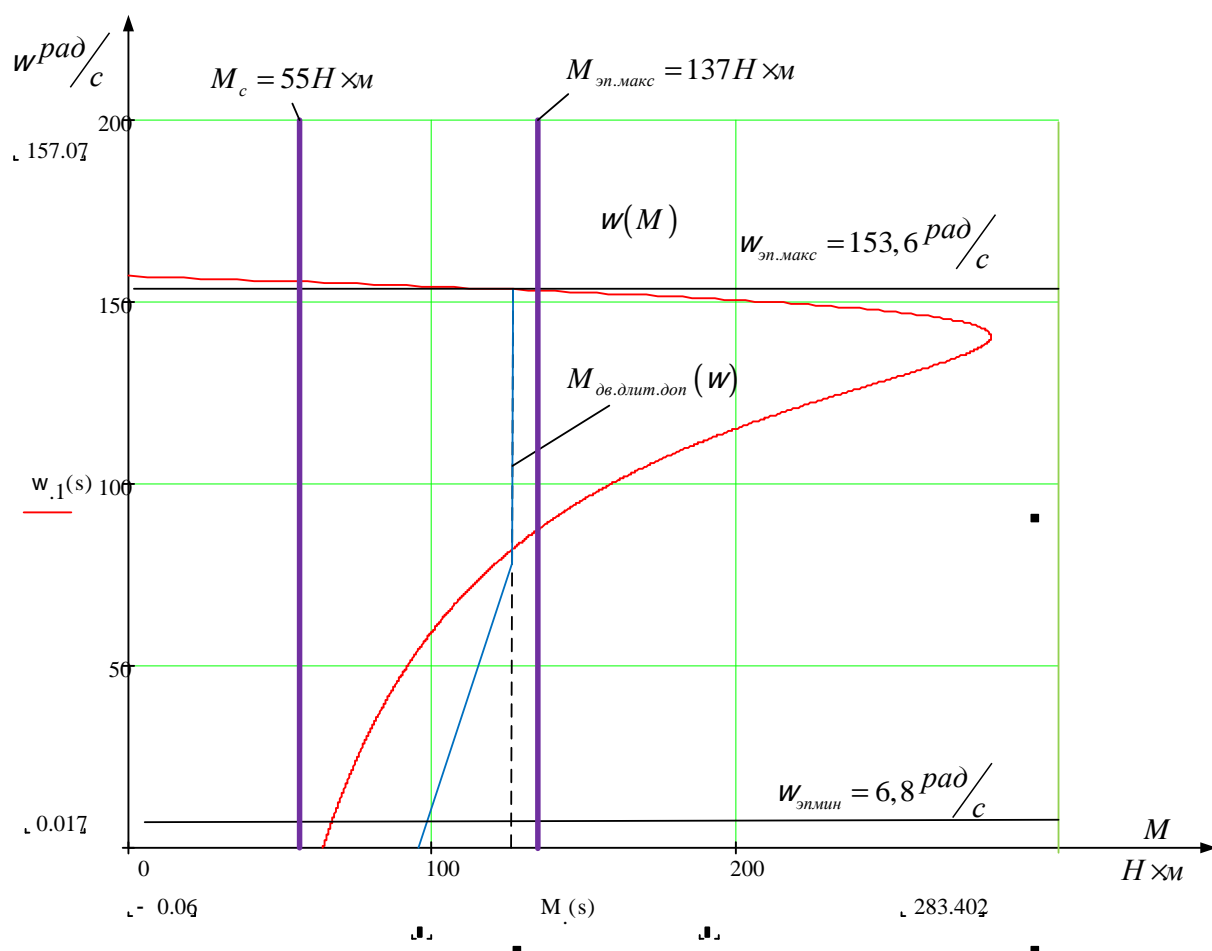


Рисунок 8 – Области работы электропривода в плоскости механических характеристик двигателя

2.5.2 Построение областей работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя

Используя полученные значения моментов, определим соответствующие им значения токов двигателя. Для этого, с помощью процедуры Given в приложении MathCAD, решая уравнение механической характеристики двигателя $M(s)$ при заданном значении момента, определяем соответствующее ему скольжение s . Подставляя полученное значение скольжения в уравнение электромеханической характеристики двигателя $I(s)$, определяем значение тока обмотки статора, соответствующее исходному значению момента.

Например, решая уравнение

$$\frac{3 \times U_{1\Phi H}^2 \times R_2(s)}{w_0 \times \left(X_{1s}(s) + X_{2s}(s) \right)^2 + \frac{R_1}{s} + \frac{R_1 \times R_2(s)}{s \times X_m}} = M_c,$$

при значении $M_c = 55 \text{ Н}\cdot\text{м}$ находим значение скольжения $s = 0,0095$ и по выражению

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2(s) + I_2^2(s) + 2 \times I_0(s) \times I_2(s) \times \sin j_2(s)},$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\Phi H}}{\pm \sqrt{\frac{R_1}{s} + \frac{R_2'(s)}{s} + [X_{1s}(s) + X_{2s}'(s)]^2 + \frac{R_1 \times R_2'(s)}{s \times X_m}}};$$

$$I_0(s) = \frac{U_{1\Phi H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1s}(s) + X_m)^2}};$$

$$\sin j_2(s) = \frac{X_{1s}(s) + X_{2s}'(s)}{\sqrt{\frac{R_1}{s} + \frac{R_2'(s)}{s} + [X_{1s}(s) + X_{2s}'(s)]^2}}$$

значение тока статора $I_{c \text{ макс}} = 18,7 \text{ A}$.

Поступая аналогично, находим:

– для момента $M_{\text{эл макс}} = 137 \text{ Н} \times \text{м}$ – $I_{\text{эл макс}} = 38,9 \text{ A}$;

Найденные значения моментов нанесены на плоскость
электромеханических характеристик электродвигателя (рисунок 10).

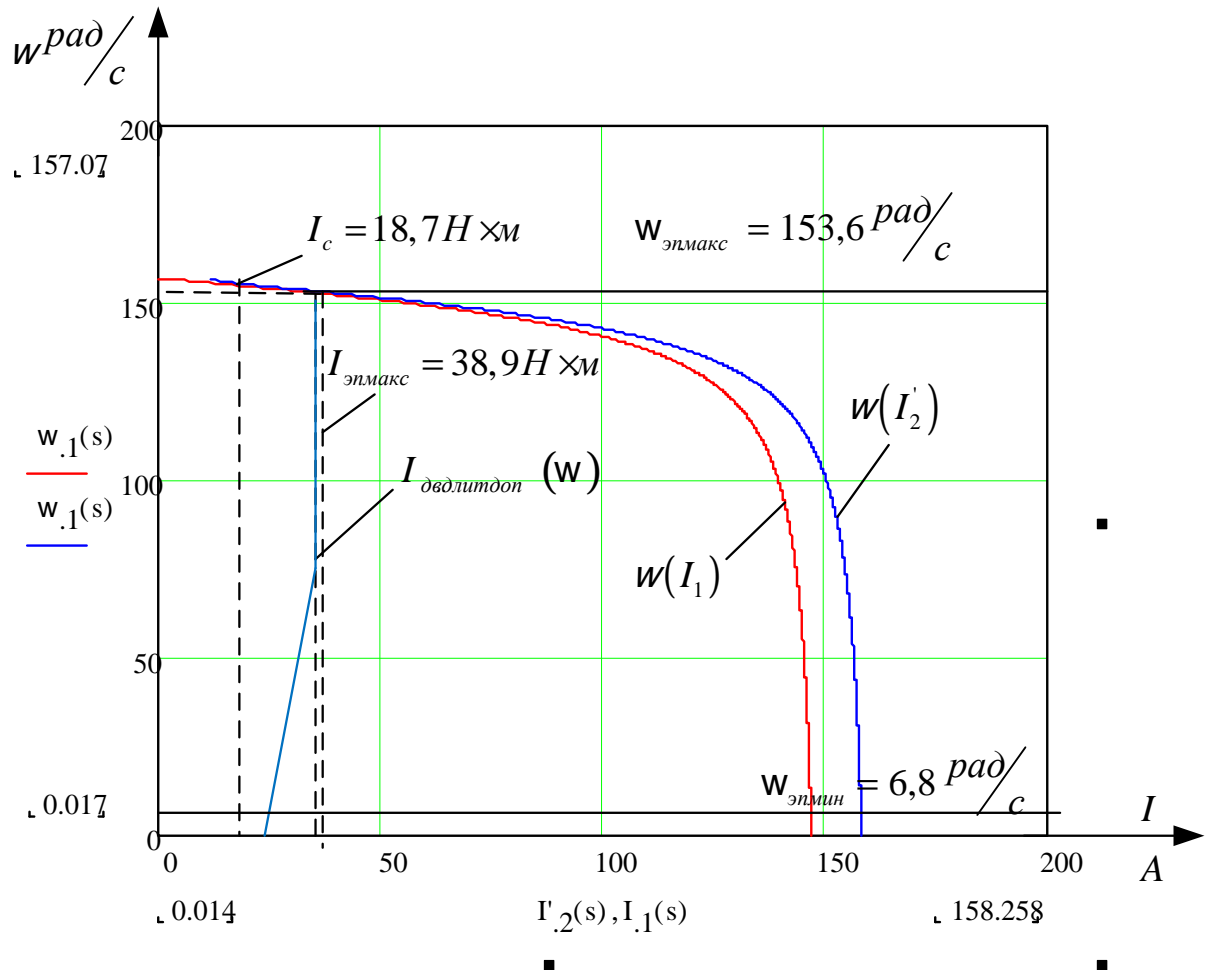


Рисунок 9 – Области работы электропривода в плоскости
электромеханических характеристик двигателя

2.6 Выбор преобразователя частоты

Основные способы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом и их показатели приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Способы управления в системе ПЧ-АД и их показатели

Способ управления	Диапазон регулирования скорости
Скалярное управление, закон управления $U_1 / f_1 = const :$ <ul style="list-style-type: none"> - разомкнутая система, в том числе с коррекцией вольт-частотной характеристики; - замкнутая система с обратной связью по току статора и компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора (IR-компенсация или компенсация нагрузки); - замкнутая система с обратной связью по току статора и компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора и повышением жесткости статических характеристик (IR-компенсация и компенсация скольжения); - замкнутая система с обратной связью по скорости; 	<p>менее 10</p> <p>10</p> <p>более 10</p> <p>до 120</p>
Векторное управление: <ul style="list-style-type: none"> - без датчика скорости (с внутренней моделью) - с датчиком скорости 	<p>100–120</p> <p>1000</p>

Принимаем способ управления – векторное управление без датчика скорости, диапазон регулирования 20. Согласно выбранному способу

управления выбираем преобразователь с возможностью векторного управления.

Тип преобразователя частоты в общем случае выбирается из следующих условий: длительный ток нагрузки, ток кратковременной перегрузки, напряжение питающей сети и двигателя, диапазон регулирования выходной частоты, способы и законы частотного управления, набор комплектующих устройств (дополнительных блоков, расширяющих возможности привода), условия эксплуатации.

Сложность выбора преобразователя частоты для совместной работы с электродвигателем заключается в том, что номинальные режимы работы электродвигателей ($S1 - S8$), основанные на постоянной времени нагрева двигателя (десятками минут), не приемлемы для преобразователей, постоянная времени нагрева которых определяется десятками секунд.

Преобразователи частоты спроектированы для продолжительной работы с номинальным током инвертора $I_{ин}$. Если номинальный ток протекает длительное время (более 60 с), то рабочая температура блока достигает максимально допустимого значения. Выше этого значения срабатывает защита ($I^2 \propto$), что не позволяет перегружать преобразователь по току даже кратковременно (рисунок 10).

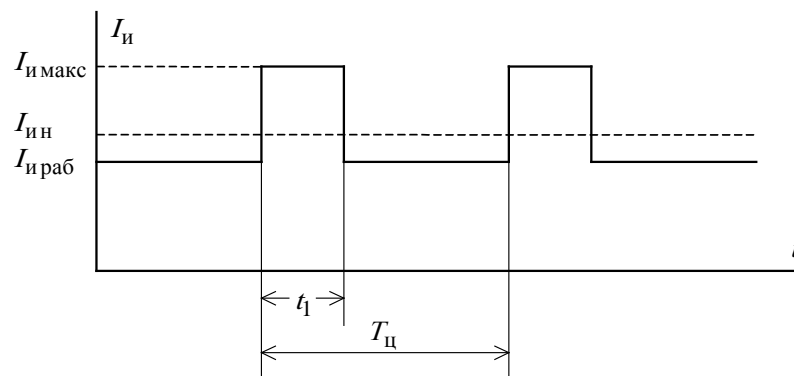


Рисунок 10

По этой причине преобразователи частоты в системах электропривода, имеющих кратковременные перегрузки двигателя, связанные с периодическими изменениями скорости или технологическими изменениями

момента нагрузки, должны работать с эквивалентным за цикл работы током, не превышающим номинальный ток инвертора

$$I_{\text{ин}} \leq I_{\text{из}}.$$

Предварительно преобразователь частоты выбираем исходя из следующих условий.

Питающая сеть: 3-х фазная 380В, 50Гц;

Параметры нагрузки:

- 3-х фазная;
- максимальное выходное линейное напряжение 380В;
- максимальная частота

$$f_{\text{макс}} > 50 \times \frac{W_{\text{эл макс}}}{W_0 \times (1 - s_k)}, \text{ Гц.}$$

- номинальный ток инвертора должен удовлетворять условию

$$I_{\text{ин}} > I_{\text{с макс}} = 18,7 \text{ А};$$

- максимальный ток инвертора должен удовлетворять условию

$$I_{\text{и макс}} > I_{\text{эл макс}} = 38,9 \text{ А}.$$

Условия выбора преобразователя по току должны быть выполнены с учетом фактических значений высоты над уровнем моря и температуры окружающей среды места установки преобразователя. Длительность перегрузки двигателя не должна превышать значение допустимого времени протекания максимального тока инвертора, а длительность фактического рабочего цикла электропривода не должна быть меньше времени предельного цикла инвертора;

Параметры преобразователя частоты

Параметры выбранного преобразователя частоты сведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры преобразователя частоты

Тип	Параметры питающей сети		Выходное напряжение U_H , В	Выходная частота f_H , Гц	Выходной ток		Рекомендуемая мощность P_2 , Вт
	$U_{1.л}$, В	f_c , Гц			$I_{VLT.H}$, А	$I_{VLT.макс}$, А	
VLT503 2 “Danfos s”	3×380	50	380	(0-132)	44	70,4	22

Принимаем несущую частоту инвертора $f_{ШИМ} = 6$ кГц.

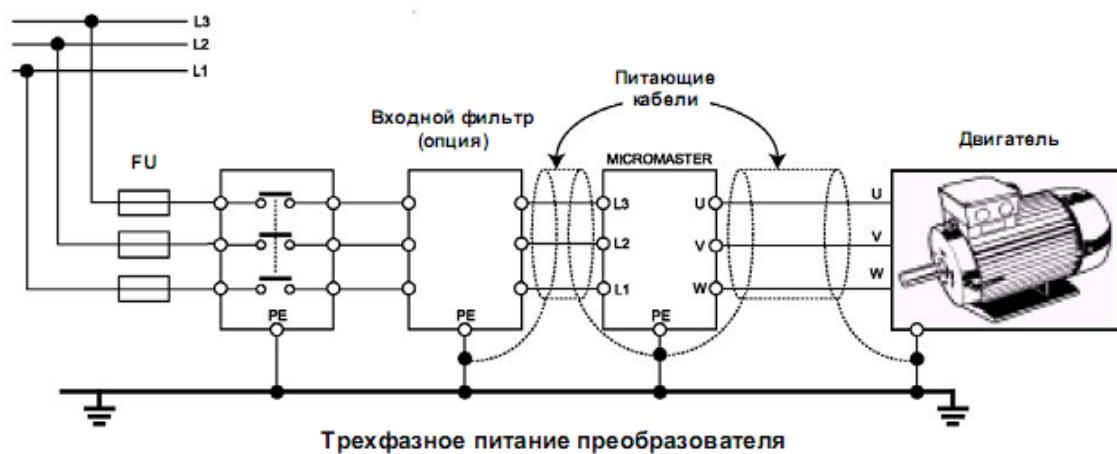


Рисунок 11 Подключение питающей сети и двигателя

Функциональная схема преобразователя представлена на рисунке 12.

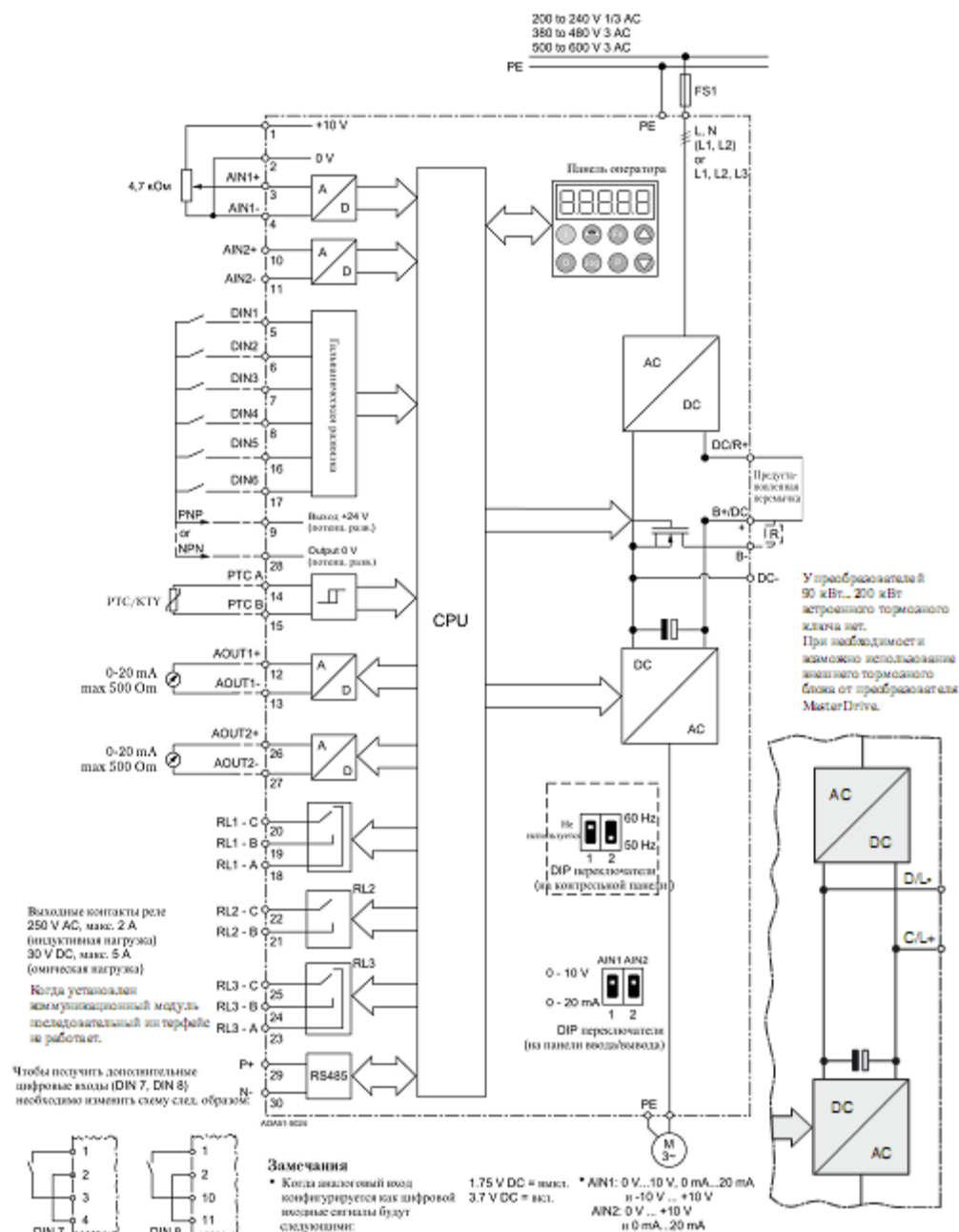


Рисунок 12- Функциональная схема преобразователя.

2.7 Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель

Структурная схема силового канала системы ПЧ – АД во вращающейся двухфазной системе координат dq , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, и компенсацией внутренних обратных связей представлена на рисунке 13.

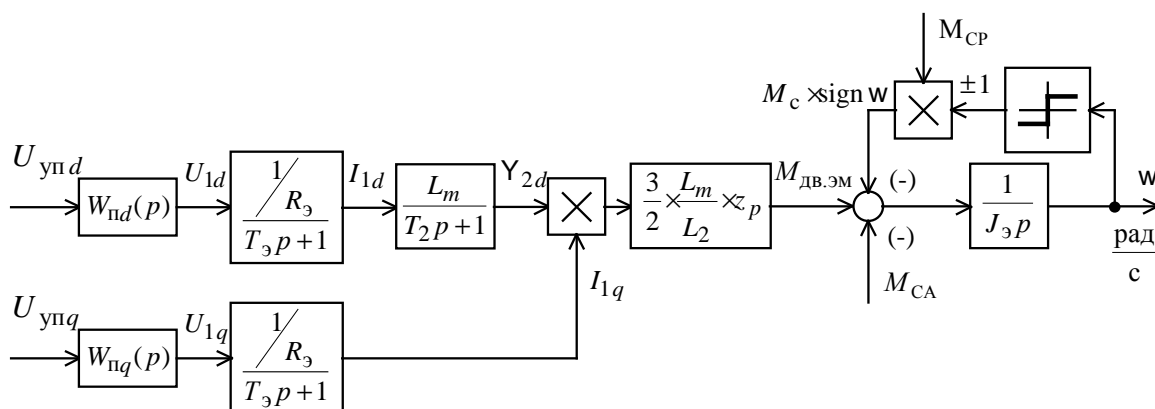


Рисунок 13 – Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель во вращающейся двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора и компенсацией внутренних обратных связей

Управляющими сигналами на входе преобразователя структурной схемы силового канала являются напряжения постоянного тока. Выходные напряжения преобразователя представляют собой составляющие напряжения статора U_{1d} и U_{1q} в ортогональной системе координат d, q , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора Y_{2d} .

В системе ПЧ – АД предполагается применить частотное векторное управление с обратной связью по скорости (с датчиком или без датчика). Характерной особенностью частотно-регулируемых электроприводов переменного тока является относительно большая инерционность в цепях обратных связей контуров регулирования тока, потокосцепления и скорости.

Рисунок 14 – Структурная схема силового канала электропривода подъёмника

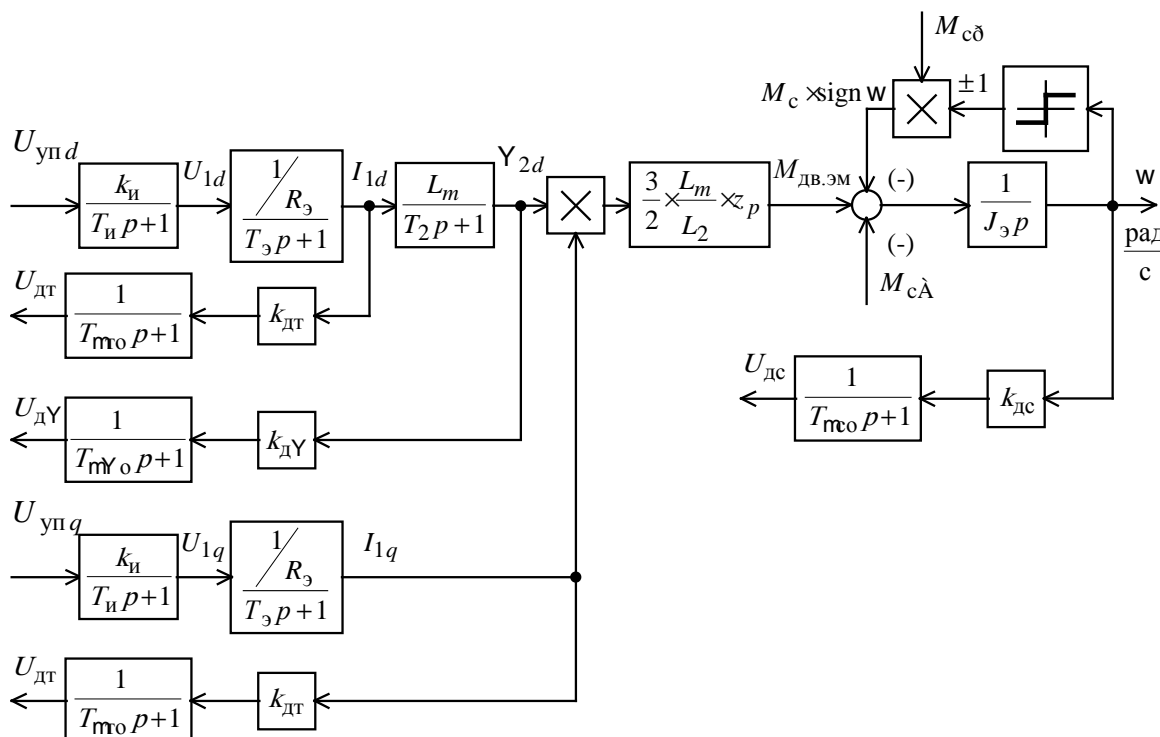


Рисунок 14 – Структурная схема силового канала электропривода подъёмника

Расчёт параметров преобразователя

$$k_{\text{и}} = \frac{\sqrt{2} \times U_{\text{лфн}}}{U_{\text{уп макс}}} = \frac{\sqrt{2} \times 220}{10} = 31,11,$$

Эквивалентная постоянная времени преобразователя

$$T_{\text{и}} = \frac{0,5}{f_{\text{шим}}} = \frac{0.5}{6 \times 10^3} = 0.0833 \times 10^{-3} \text{ с},$$

где $f_{\text{ШИМ}} = 6 \text{ кГц}$ – несущая частота инвертора.

Расчет параметров двигателя

Эквивалентная индуктивность обмотки статора

$$L_1 = L_{1s} + L_m = 1,96 \times 10^{-3} + 56,65 \times 10^{-3} = 58,61 \times 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Эквивалентная индуктивность обмотки ротора

$$L_2 = L_{2s} + L_m = 2,64 \times 10^{-3} + 56,65 \times 10^{-3} = 59,29 \times 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Эквивалентное сопротивление силовой цепи преобразователь-двигатель

$$R_3 = R_1 + R_2 \times \frac{L_m^2}{L_2^2} = 0,158 + 0,155 \times \frac{(56,65 \times 10^{-3})^2}{(59,29 \times 10^{-3})^2} = 0,3 \text{ Ом.}$$

Эквивалентная электромагнитная постоянная времени силовой цепи

$$T_3 = \frac{s \times L_1}{R_3} = \frac{0,0765 \times 58,61 \times 10^{-3}}{0,3} = 14,9 \times 10^{-3} \text{ с,}$$

где

$$s = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \times L_2} = 1 - \frac{(56,65 \times 10^{-3})^2}{58,61 \times 10^{-3} \times 59,29 \times 10^{-3}} = 0,0765$$

– коэффициент рассеяния.

Электромагнитная постоянная времени цепи ротора

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} = \frac{59,29 \times 10^{-3}}{0,155} = 0,383 \text{ с.}$$

2.7.2 Расчет параметров механической системы

Момент инерции механизма

$$J_M = 0,5 \times J_{дв} = 0,5 \times 0,13 = 0,065 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Эквивалентный момент инерции привода

$$J_{\Theta} = J_{дв} + J_M = 0,13 + 0,065 = 0,195 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

3 СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ЛИНЕРИЗИРОВАННОЙ САУ

3.1 Структурная схема линеаризованной САУ РЭП

Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно - регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 15 [2].

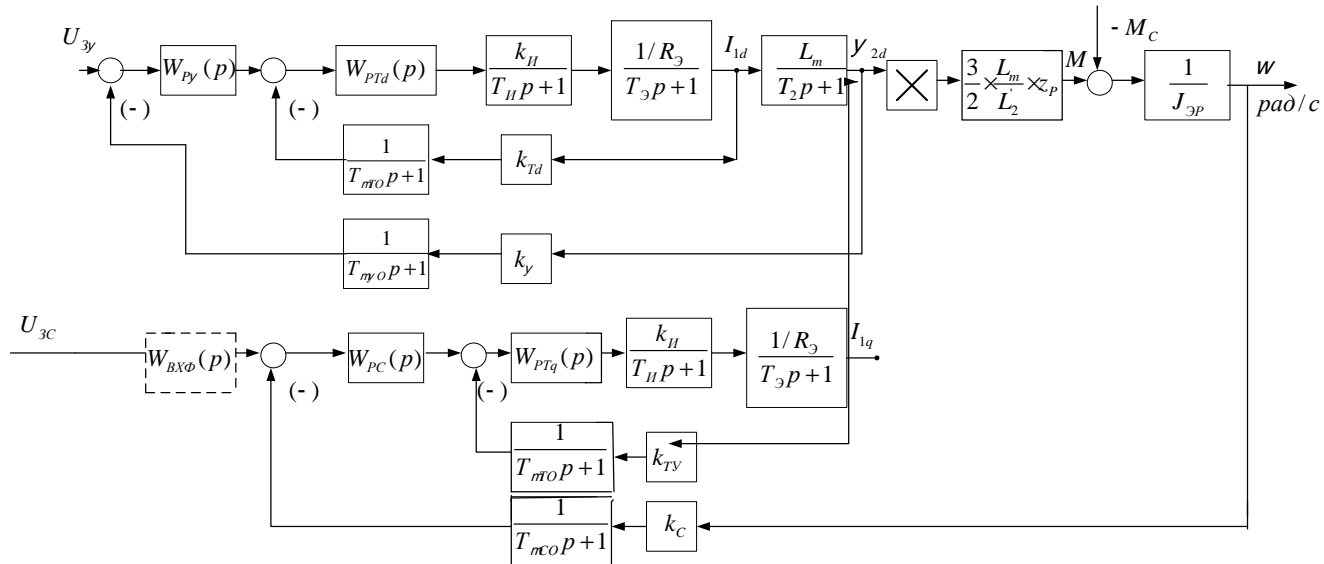


Рисунок 15 – Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ РЭП частотно–регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

На схеме приняты следующие обозначения:

$W(p)_{PT}, W(p)_{PY}, W(p)_{PC}$ - передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости соответственно;

Имеем $U_{3TMAKC} = 10$ В.

Коэффициент обратной связи по току

$$k_T = \frac{U_{3TMAKC}}{I_{1YMAKC}} = \frac{10}{52,4} = 0,19 \text{ В/А}.$$

Максимально допустимое значение тока

$$I_{1YMAKC} = \sqrt{2} \times \sqrt{I_{ЭПMAKC}^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \times \sqrt{38,9^2 - 11,954^2} = 52,4 \text{ А}$$

Период сглаживания результатов измерения тока

$$T_{CT} = \frac{1}{f_{ШИМ}} \times n_T = \frac{1}{6 \times 10^3} \times 6 = 0,001 \text{ с},$$

где $n_T = 8$ количество измерений.

Малая постоянная времени цепи обратной связи по току

$$T_{\pi 0} = \frac{T_{CT}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с.}$$

Имеем $U_{3y \text{ МАКС}} = 10 \text{ В.}$

Значение номинального потокосцепления двигателя

$$\psi_{2XH} = \psi_H = \frac{M_{ЭИН}}{\frac{3}{2} \times Z_p \times \frac{L_m}{L_2} \times \sqrt{2} \times \sqrt{I_{1H}^2 + I_0^2}} = \frac{120,75}{\frac{3}{2} \times 2 \times \frac{0,05665}{0,05929} \times \sqrt{2} \times \sqrt{35,59^2 + 11,543^2}} = 0,885 \text{ Вб.}$$

Коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора

$$k_y = \frac{U_{3y \text{ МАКС}}}{\psi_{2XH}} = \frac{10}{0,885} = 11,3 \text{ В/Вб.}$$

Период расчета потокосцепления:

имеем $n_y = 3$;

$$T_{cy} = \frac{1}{f_{ШИМ}} \times \frac{1}{n_y} = \frac{1}{8 \times 10^3} \times 3 = 0,000375 \text{ с.}$$

Малая постоянная времени цепи обратной связи по потокосцеплению

$$T_{\pi 0} = \frac{T_{cy}}{3} = \frac{0,000375}{3} = 0,000125 \text{ с.}$$

Имеем $U_{3c \text{ МАКС}} = 10 \text{ В ; } f_{ШИМ} = 8 \text{ кГц.}$

Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_c = \frac{U_{3c \text{ МАКС}}}{\omega_{ЭПМАКС}} = \frac{10}{153,6} = 0,065 \text{ В·с/рад.}$$

Период расчета скорости:

$$\text{Имеем } n_c = 3; T_{cc} = \frac{1}{f_{ШИМ}} \times \frac{1}{n_c} = \frac{1}{8 \times 10^3} \times 3 = 0,000375 \text{ с.}$$

Малая постоянная времени цепи обратной связи по скорости

$$T_{\pi 0} = \frac{T_{cc}}{3} = \frac{0,000375}{3} = 0,000125 \text{ с.}$$

3.2 Оптимизация контура тока

Контур регулирования тока имеет относительно большую инерционность в цепи обратной связи [2].

Структурная схема контура тока с инерционной обратной связью и полной компенсацией внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя приведена на рисунке 16 контуры токов I_{1x} и I_{1y} идентичные.

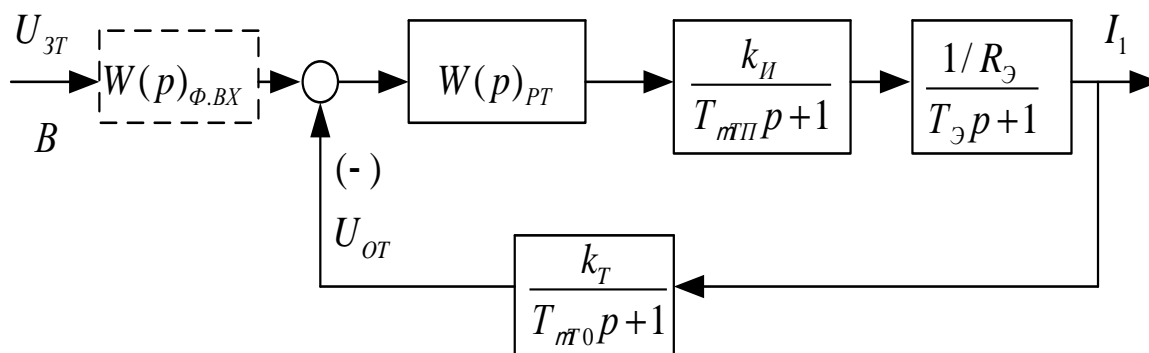


Рисунок 16 – Структурная схема контура тока

На схеме рисунке 16 приняты следующие обозначения:

U_{3T} – напряжение задания на ток, В;

$T_{нП}$ – малая постоянная времени в прямом канале, с;

$$T_{нП} = T_{и} = 6,25 \times 10^{-5} \text{ с.}$$

$T_{н0}$ – малая постоянная времени в цепи обратной связи, с.

Передаточная функция ПИ-регулятора тока

$$W_{РТ}(p) = k_{РТ} \times \frac{T_{РТ} \times p + 1}{T_{РТ} \times p} = 0,951 \times \frac{0,0149 \times p + 1}{0,0149 \times p}.$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{РТ} = \frac{T_{э} \times R_{э}}{k_{и} \times k_{Т} \times a_{Т} \times (T_{нП} + T_{н0})} = \frac{0,0149 \times 0,3}{31,113 \times 0,19 \times 2 \times (0,0000625 + 0,000333)} = 0,951, \text{ где}$$

$$k_{Т} = \frac{U_{3T \text{ МАКС}}}{I_{1y \text{ МАКС}}} = \frac{10}{52,4} = 0,19 \text{ В/А};$$

$$U_{3T \text{ МАКС}} = 10 \text{ В};$$

$a_{Т} = 2$ – коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора тока

$$T_{\text{PT}} = T_{\text{Э}} = 0,0149 \text{ с};$$

Контур тока имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{РАЗ.Т}} = \frac{1}{a_{\text{T}} \times T_{\text{мП}} \times T_{\text{м0}} \times T_{\text{мЭ}} \times p^3 + a_{\text{T}} \times T_{\text{мЭ}}^2 \times p^2 + a_{\text{T}} \times T_{\text{мЭ}} \times p} =$$

$$= \frac{1}{2 \times 0,0000625 \times 0,000333 \times 0,000396 \times p^3 + 2 \times 0,000396^2 \times p^2 + 2 \times 0,000396 \times p};$$

- замкнутого контура

$$W(p)_{\text{ЗАМ.Т}} = \frac{\frac{1}{k_{\text{T}}} \times (T_{\text{м0}} \times p + 1)}{a_{\text{T}} \times T_{\text{мП}} \times T_{\text{м0}} \times T_{\text{мЭ}} \times p^3 + a_{\text{T}} \times T_{\text{мЭ}}^2 \times p^2 + a_{\text{T}} \times T_{\text{мЭ}} \times p + 1} \gg$$

$$\gg \frac{\frac{1}{k_{\text{T}}} \times (T_{\text{м0}} \times p + 1)}{a_{\text{T}} \times T_{\text{мЭ}}^2 \times p^2 + a_{\text{T}} \times T_{\text{мЭ}} \times p + 1} \gg \frac{\frac{1}{0,19} \times (0,000333 \times p + 1)}{2 \times 0,000396^2 \times p^2 + 2 \times 0,000396 \times p + 1};$$

где $T_{\text{мЭ}} = T_{\text{мП}} + T_{\text{м0}} = 0,0000625 + 0,000333 = 0,000396 \text{ с}$ - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Настройка контура близка к настройке на модульный оптимум (МО) системы 2-го порядка. Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению.

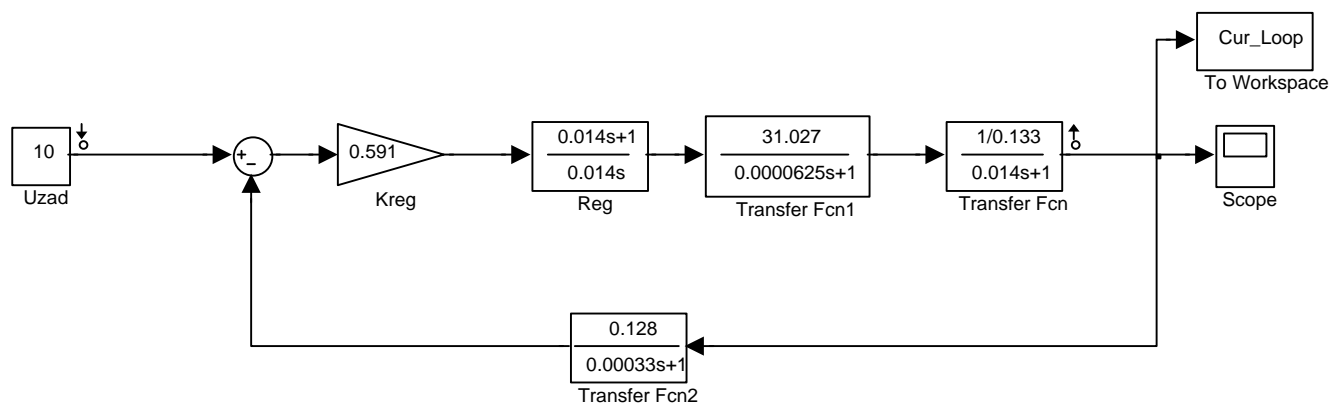


Рисунок 17 – Имитационная модель контура тока в среде Simulink
(без фильтра на входе)

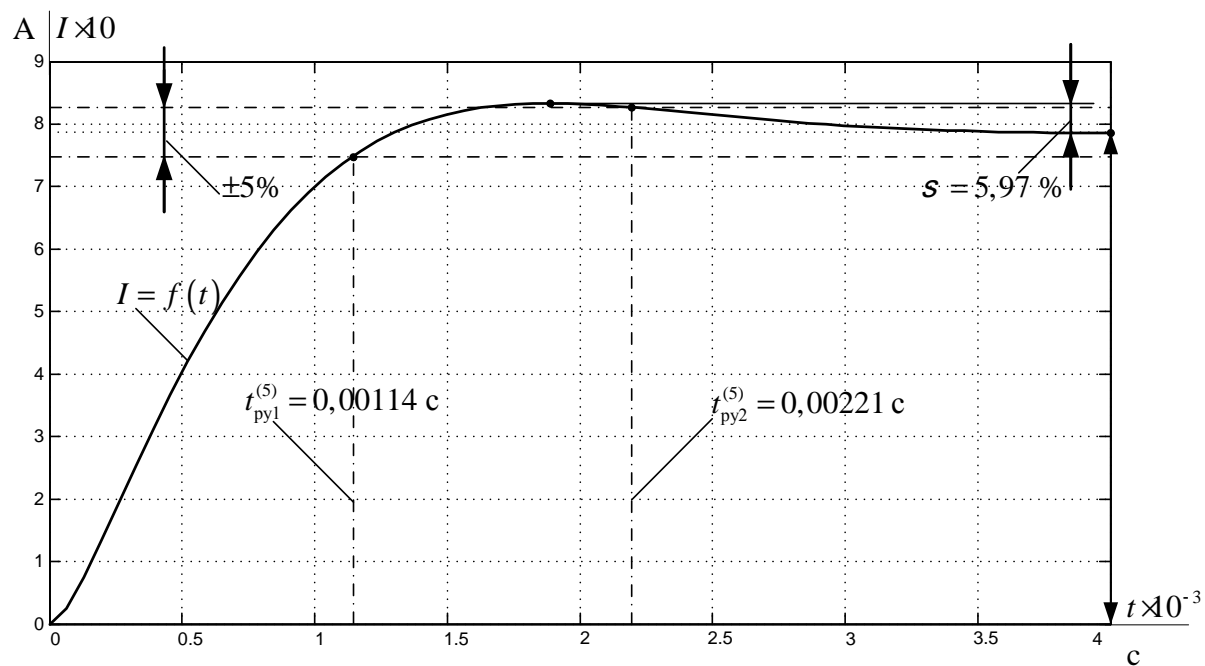


Рисунок 18– Переходная характеристика $i(t)$ контура тока
по имитационной модели рисунка 17

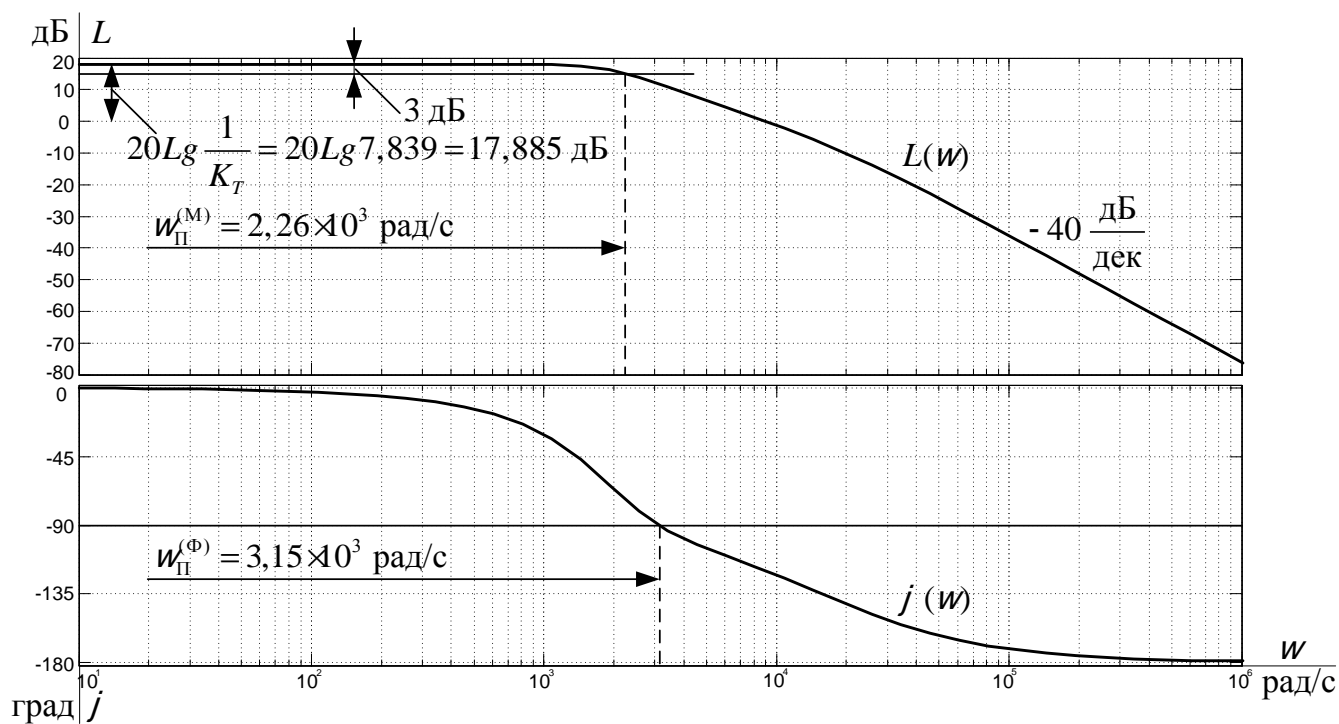


Рисунок 19 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого
контура тока, настроенного на МО (без фильтра на входе)

Разомкнутый контур тока

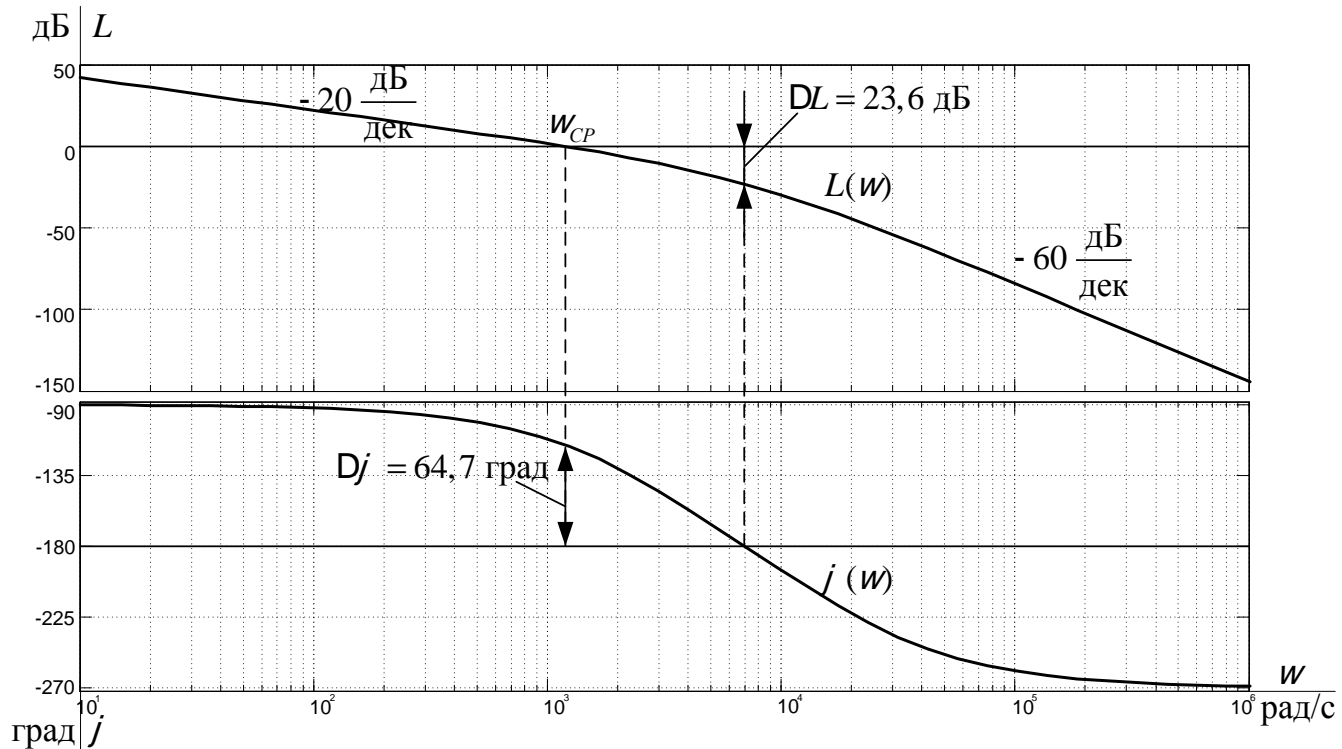


Рисунок 20 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура тока, настроенного на МО (без фильтра на входе)

При $T_{\pi\Pi} \ll T_{\pi0} = (0,0000625 \ll 0,000333)$ ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура тока по управлению без фильтра на входе:

- установившаяся ошибка $DI_{уст} = 0$ А ;
- полоса пропускания по модулю $\omega_{\Pi}^{(M)} = \infty$;
- полоса пропускания по фазе
-

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} \gg \frac{0.9}{T_{\pi\Pi} + T_{\pi0}} \gg \frac{0.9}{0,0000625 + 0,000333} = 2273,68 \text{ рад/с} ;$$

- перерегулирование $s \gg 6,7$ % ;
- время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при отработке ступенчатого задания

$$t_{py1}^{(5)} \gg 2,75 \times (T_{\pi\Pi} + T_{\pi0}) \gg 2,75 \times (0,0000625 + 0,000333) = 0,00109 \text{ с};$$

$$t_{py2}^{(5)} \gg 6 \times (T_{\pi\Pi} + T_{\pi0}) \gg 6 \times (0,0000625 + 0,000333) = 0,002375 \text{ с}.$$

Таблица 5 – Показатели переходных процессов контура тока с ПИ – регулятором (без фильтра на входе)

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{py1}^{(5)}, \text{с}$	$t_{py2}^{(5)}, \text{с}$	$s, \%$	$Dl_{уст}, A$
Ожидаемые показатели (без фильтра на входе)			
0,00109	0,002375	6,7	0
Результаты моделирования (без фильтра на входе)			
0,00114	0,00221	5,97	0

- запас устойчивости по модулю $DL = 23,6 \text{ дБ}$;
- запас устойчивости по фазе $Dj = 64,7 \text{ град}$.

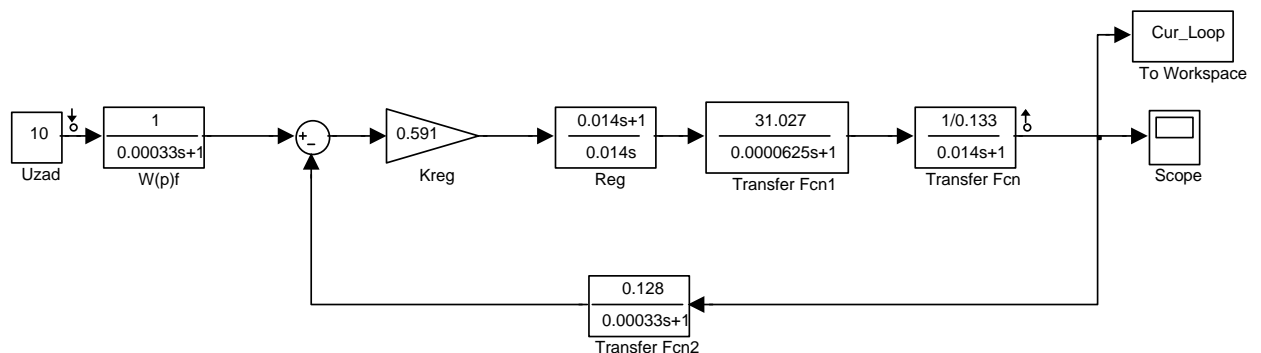


Рисунок 21 – Имитационная модель контура тока в среде Simulink (с фильтром на входе)

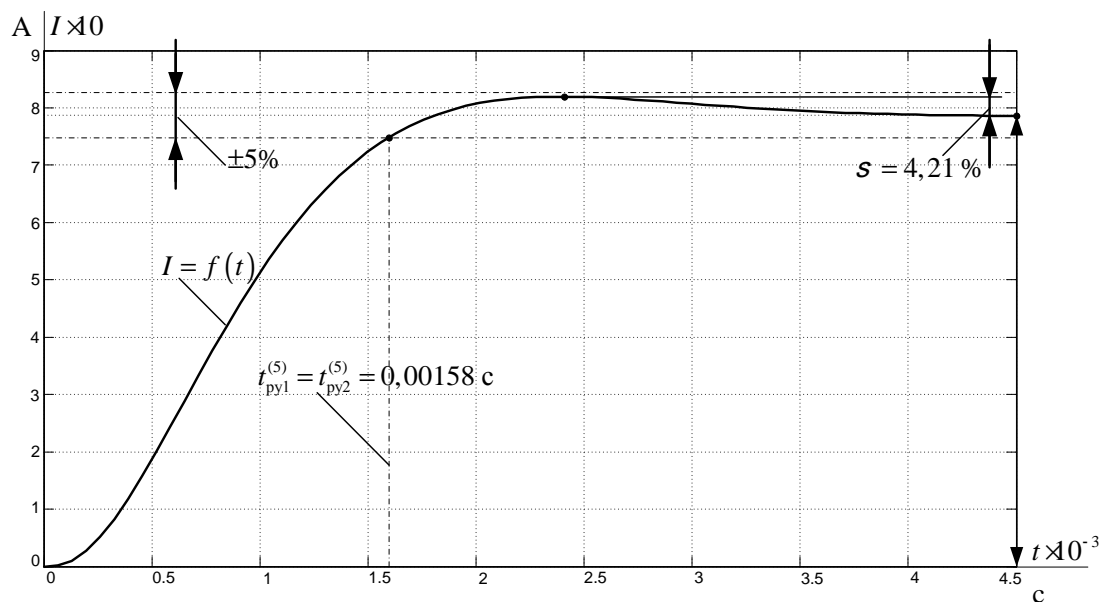


Рисунок 22 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура

тока, настроенного на МО (с фильтром на входе)

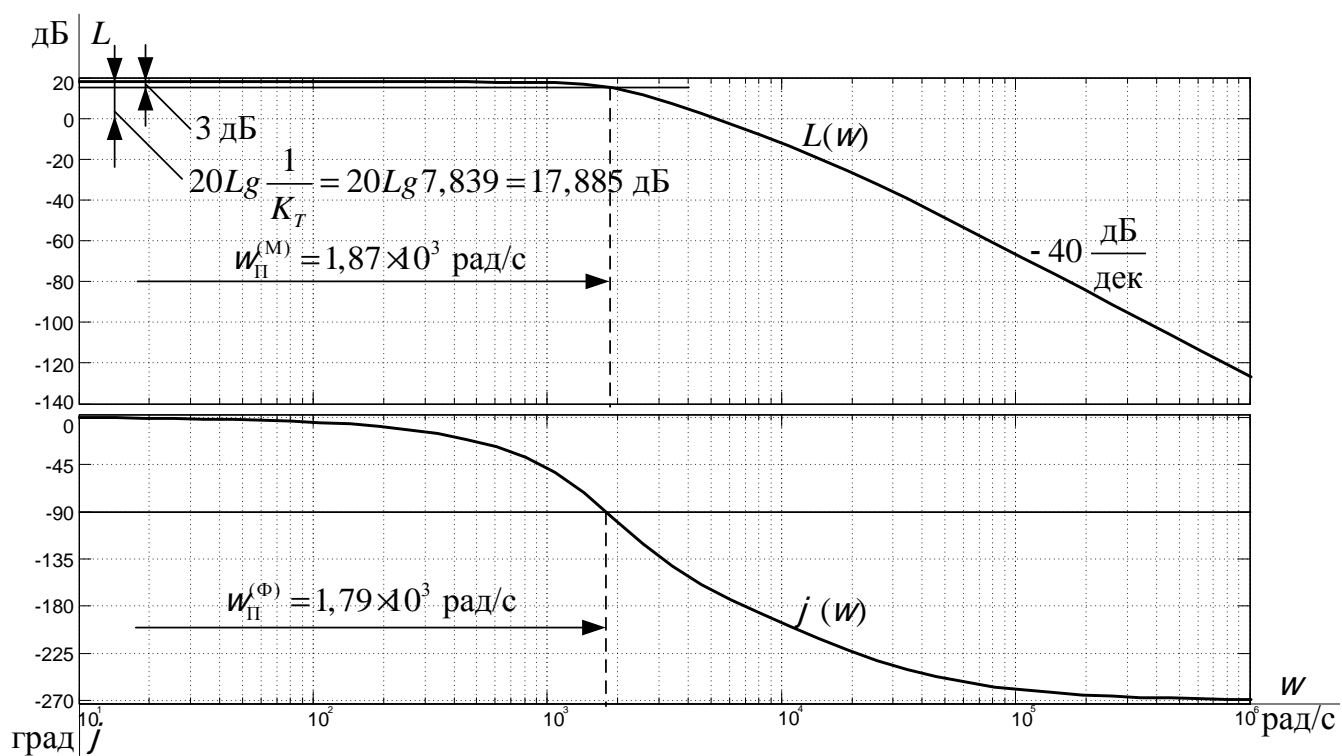


Рисунок 23 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура

тока, настроенного на МО (с фильтром на входе)

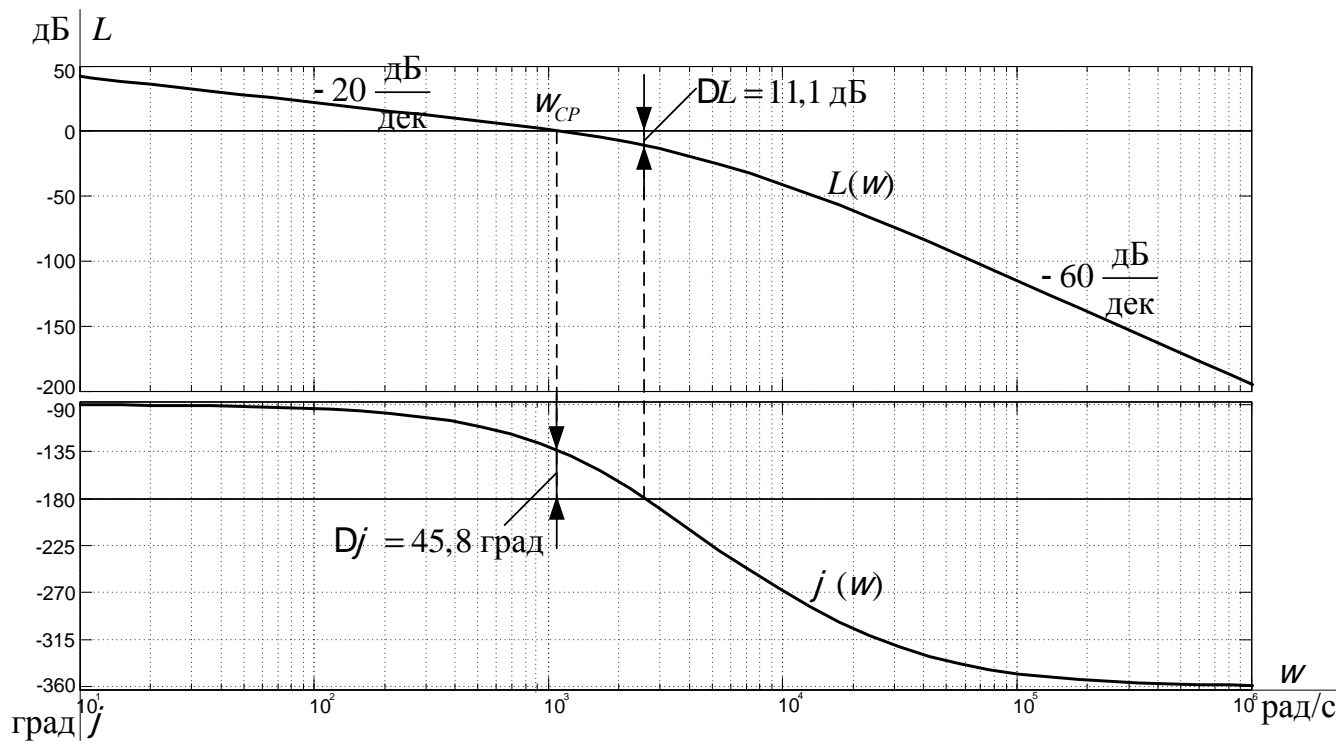


Рисунок 24 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура тока, настроенного на МО (без фильтра на входе)

При $T_{\pi\Pi} \ll T_{\pi0} = (0,0000625 \ll 0,000333)$ ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура тока по управлению с фильтром на входе:

- установившаяся ошибка $DI_{уст} = 0$ А ;
- перерегулирование $s = 4,3$ % ;
- время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при отработке ступенчатого задания

$$t_{py1}^{(5)} = t_{py1}^{(5)} \gg 4,1 \times (T_{\pi\Pi} + T_{\pi0}) \gg 4,1 \times (0,0000625 + 0,000333) = 0,001623 \text{ с ;}$$

- полоса пропускания по модулю и фазе

$$\omega_{\Pi}^{(M)} \gg \omega_{\Pi}^{(\Phi)} \gg \frac{0,71}{T_{\pi\Pi} + T_{\pi0}} \gg \frac{0,71}{0,0000625 + 0,000333} = 1793,68 \text{ рад/с ;}$$

- запас устойчивости по модулю $DL = 11,1$ дБ
- запас устойчивости по фазе $Dj = 45,8$ град

Таблица 6 – Показатели переходных процессов контура тока с ПИ – регулятором (с фильтром на входе)

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	s , %	$DI_{уст}$, А
Ожидаемые показатели (с фильтром на входе)			
0,001623	0,001623	4,3	0
Результаты моделирования (с фильтром на входе)			
0,00158	0,00158	4,21	0

Вывод: в таблицах 6 и 7 сведены теоретические и экспериментальные показатели качества линеаризованного контура тока без фильтра и с фильтром на входе соответственно. Настройка контура близка к настройке на модульный оптимум (МО) системы 2-го порядка, вследствие этого полученные данные немного отличаются от ожидаемых показателей. Незначительная величина полученных отклонений позволяет нам сказать, что контур оптимизирован верно. Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению.

При установке на вход контура тока фильтра уменьшаются запасы устойчивости по модулю и по фазе, также уменьшаются полосы пропускания по модулю и по фазе, уменьшается перерегулирование, быстродействие системы увеличивается.

Качество переходных процессов в контуре тока с фильтром на входе лучше, чем без него (малое перерегулирование).

4.3 Оптимизация контура потокосцепления

Контур регулирования потокосцепления имеет относительно большую инерционность в цепи обратной связи [2].

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{ЗАМ.Т}} \gg \frac{1}{T_T \times p + 1} \gg \frac{1}{0,000792 \times p + 1} \gg \frac{5,3}{0,000792 \times p + 1},$$

где $T_T = a_T \times T_{\text{мт}\Theta} = a_T \times (T_{\text{мтП}} + T_{\text{мт0}}) = 2 \times (0,0000625 + 0,000333) = 0,000792$ с –

эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Структурная схема контура потокоцепления с инерционной обратной связью и ПИ – регулятором приведена на рисунке 25.

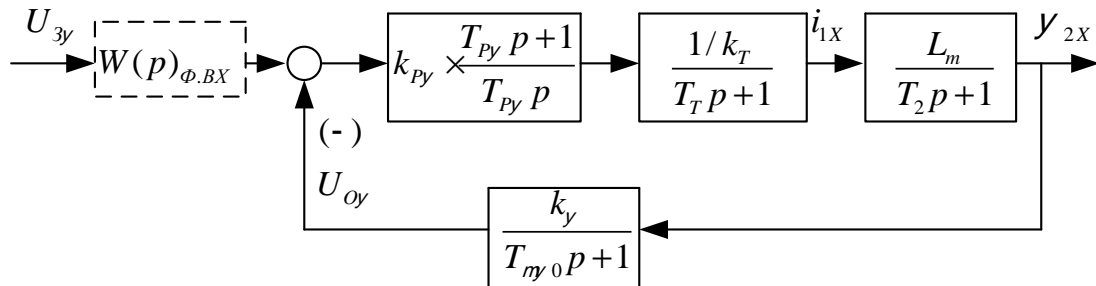


Рисунок 25 – Структурная схема контура потокоцепления с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора потокоцепления

$$W(p)_{\text{py}} = k_{\text{py}} \times \frac{T_{\text{py}} \times p + 1}{T_{\text{py}} \times p} = 48 \times \frac{0,888 \times p + 1}{0,888 \times p}.$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора потокоцепления определяются по выражениям

$$k_{\text{py}} = \frac{T_2 \times k_T}{L_m \times k_y} \times \frac{1}{a_y \times (T_T + T_{\text{мт}0})} = \frac{0,383 \times 0,19}{0,05665 \times 1,3} \times \frac{1}{2 \times (0,000792 + 0,002)} = 20,2,$$

где $k_y = \frac{U_{3y \text{ МАКС}}}{y_{2\text{ХН}}} = \frac{10}{0,885} = 11,3$ В/Вб ; $U_{3y \text{ МАКС}} = 10$ В;

$a_y = 2$ - коэффициент оптимизации.

Контур потокоцепления с ПИ – регулятором настроенный таким образом имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{РАЗ.У}} = \frac{1}{a_y \times T_T \times T_{\text{мт}0} \times T_{\text{мт}\Theta} \times p^3 + a_y \times T_{\text{мт}\Theta}^2 \times p^2 + a_y \times T_{\text{мт}\Theta} \times p} \gg \frac{1}{2 \times 0,000792 \times 0,002 \times 0,00279 \times p^3 + 2 \times 0,00279^2 \times p^2 + 2 \times 0,00279 \times p};$$

- замкнутого контура

$$W(p)_{\text{зам.конт.}} = \frac{\frac{1}{k_y} \times (T_{\text{м}0} \times p + 1)}{a_y \times T_{\text{Т}} \times T_{\text{м}0} \times T_{\text{м}0} \times p^3 + a_y \times T_{\text{м}0}^2 \times p^2 + a_y \times T_{\text{м}0} \times p + 1} \gg$$

$$\gg \frac{\frac{1}{k_y} \times (T_{\text{м}0} \times p + 1)}{a_y \times T_{\text{м}0}^2 \times p^2 + a_y \times T_{\text{м}0} \times p + 1} \gg \frac{\frac{1}{11,3} \times (0,002 \times p + 1)}{2 \times 0,00279^2 \times p^2 + 2 \times 0,00279 \times p + 1};$$

где $T_{\text{м}0} = T_{\text{Т}} + T_{\text{м}0} = 0,000792 + 0,002 = 0,00279$ с – эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

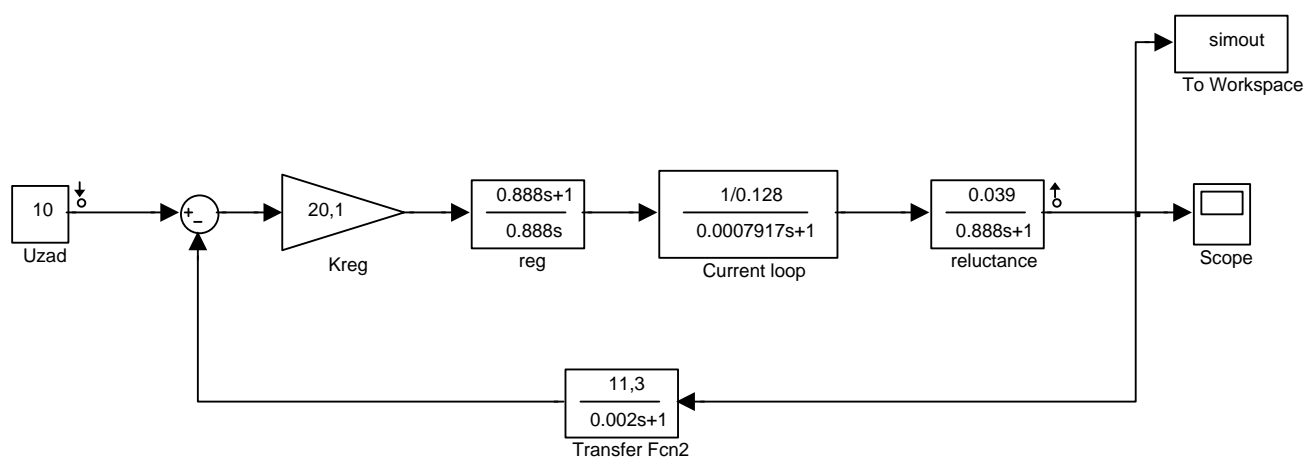


Рисунок 26 – Имитационная модель контура потокосцепления в среде Simulink

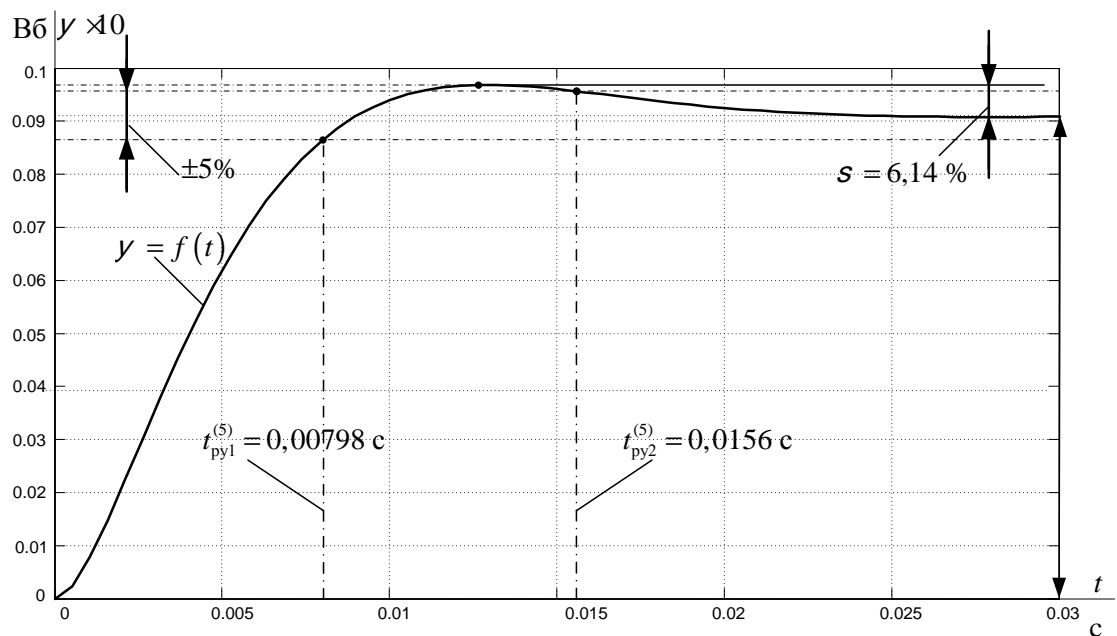


Рисунок 27 – Переходная характеристика $y(t)$ контура потокосцепления по имитационной модели рисунка 24

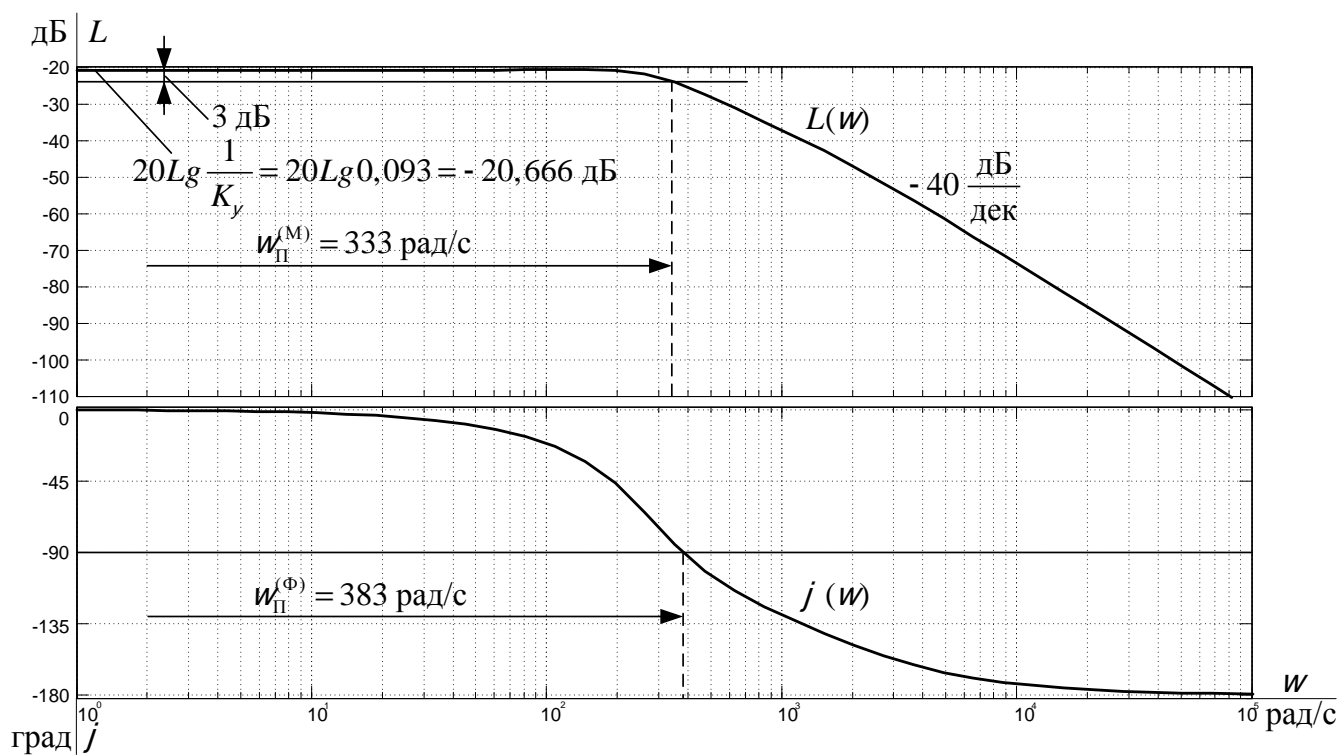


Рисунок 28 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура потокосцепления, настроенного на МО (без фильтра на входе)

Разомкнутый контур

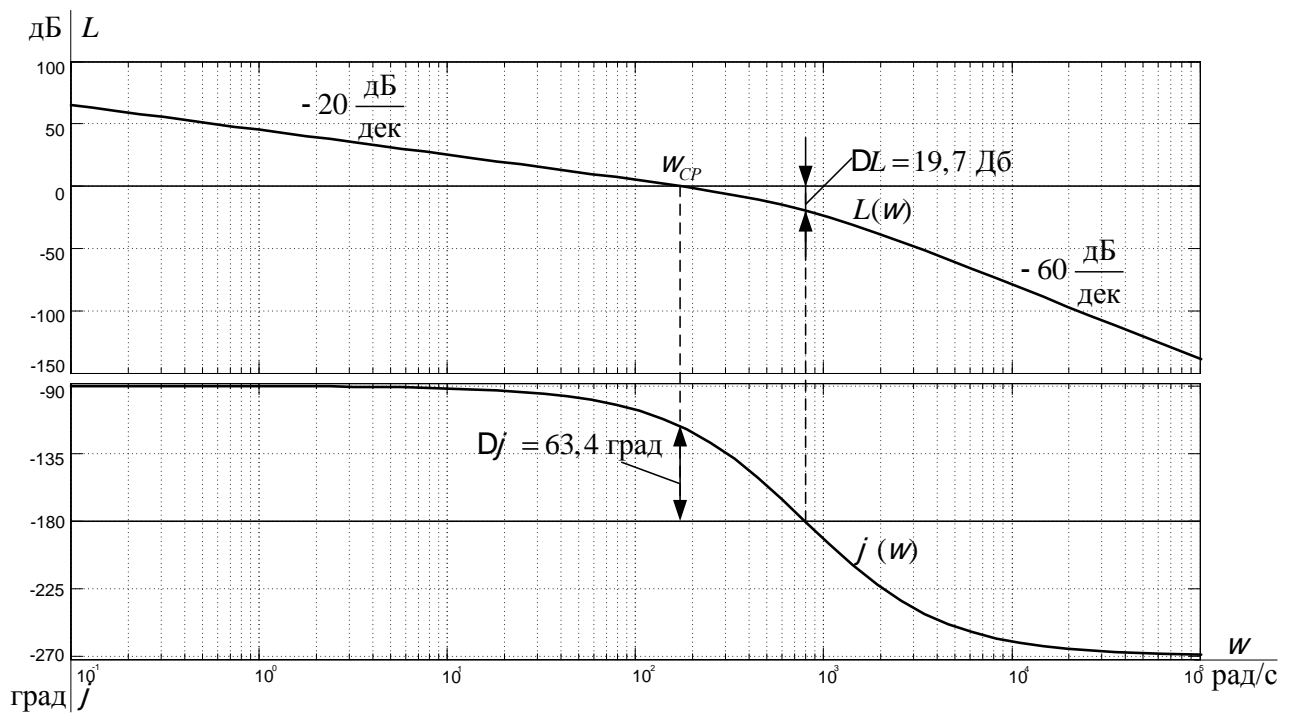


Рисунок 29 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура потокосцепления, настроенного на МО (без фильтра на входе)

Настройка контура близка к настройке на модульный оптимум системы второго порядка. Контур является астатической системой регулирования первого порядка по управлению и обеспечивает нулевую установившуюся ошибку $Du_{уст} = 0$. В зависимости от соотношения малых постоянных времени T_T и T_{m0} контур имеет следующие динамические показатели качества работы:

- показатели отработки скачка задания
- перерегулирование $s = (4,3, 6,7)\%$;
- время вхождения в 5%-ю зону

$$t_{pyl}^{(5)} = (4,1, 2,75) \times (T_T + T_{m0}) = (4,1, 2,75) \times (0,000792 + 0,002) = 0,011, 0,007677 \text{ с.}$$

Для замкнутого контура

- полоса пропускания по модулю

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{(0,71, 0,9)}{T_T + T_{m\gamma 0}} = \frac{(0,71, 0,9)}{0,000792 + 0,002} = 254,33, 322,4 \text{ рад/с} ;$$

из характеристик видно, что:

полоса пропускания по модулю $\omega_{\Pi}^{(M)} = 333 \text{ рад/с} ;$

полоса пропускания по фазе $\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 385 \text{ рад/с} ;$

Для разомкнутого контура

запас устойчивости по модулю $DL = 19,7 \text{ дБ} ;$

запас устойчивости по фазе $Dj = 63,4 \text{ град} .$

Таблица 7 – Показатели переходных процессов по управлению
оптимизированного контура потокосцепления с ПИ – регулятором

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{py1}^{(5)}, \text{ с}$	$t_{py2}^{(5)}, \text{ с}$	$s, \%$	$Dy_{уст}, \text{ Вб}$
Ожидаемые показатели			
0,007677	-	(4.3 , 6.7)	0
Результаты моделирования			
0,00798	0,0156	6,14	0

Вывод: Так как настройка контура потокосцепления производилась приближенно на модульный оптимум второго порядка, передаточная функция замкнутого контура имеет третий порядок, причем в знаменателе присутствует форсирующее звено то, вследствие этого полученные данные немного отличаются от ожидаемых показателей. Незначительная величина полученных отклонений позволяет нам сказать, что контур оптимизирован верно.

3.4 Оптимизация контура скорости с ПИ– регулятором

Контур регулирования тока имеет относительно большую инерционность в цепи обратной связи.

При оптимизации контура скорости внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{зам.т}} \gg \frac{1}{T_T \times p + 1} \gg \frac{1}{0,000792 \times p + 1};$$

где $T_T = a_T \times T_{\text{мт}\Theta} = a_T \times (T_{\text{мтП}} + T_{\text{мт0}}) = 2 \times (0,0000625 + 0,000333) = 0,000792 \text{ с}$ -

эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Структурная схема контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором приведена на рисунке 30.

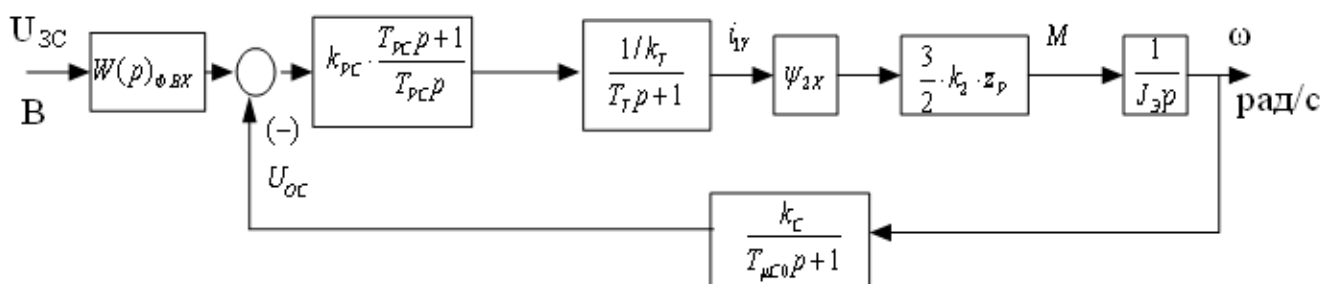


Рисунок 30 – Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора

$$W(p)_{\text{PC}} = k_{\text{PC}} \times \frac{T_{\text{PC}} \times p + 1}{T_{\text{PC}} \times p} = 77,85 \times \frac{0,011 \times p + 1}{0,011 \times p}.$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора скорости определяются по выражениям

$$k_{\text{PC}} = \frac{J_{\Theta} \times k_T}{y_{2X} \times \frac{3}{2} \times \frac{L_m}{L_2} \times z_p \times k_C} \times \frac{1}{a_C \times (T_T + T_{\text{мт0}})} = \frac{0,195 \times 0,19}{0,885 \times \frac{3}{2} \times \frac{0,05665}{0,05929} \times 2 \times 0,065} \times \frac{1}{2 \times (0,000792 + 0,002)} = 40,23$$

где $T_{\text{PC}} = b_C \times a_C \times (T_T + T_{\text{мт0}}) = 2 \times 2 \times (0,000792 + 0,002) = 0,011 \text{ с}$ - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Оптимизированный контур скорости с ПИ-регулятором имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{РАЗ.К}} = \frac{a_c \times b_c \times T_{\text{мсэ}} \times p + 1}{b_c \times a_c^2 \times T_T \times T_{\text{мс0}} \times T_{\text{мсэ}}^2 \times p^4 + b_c \times a_c^2 \times T_{\text{мсэ}}^3 \times p^3 + b_c \times a_c^2 \times T_{\text{мсэ}}^2 \times p^2} =$$

$$= \frac{2 \times 10^{-2} \times 0,002792 \times p + 1}{2 \times 10^{-2} \times 0,000792 \times 0,002 \times 0,002792^2 \times p^4 + 2 \times 10^{-2} \times 0,002792^3 \times p^3 + 2 \times 10^{-2} \times 0,002792^2 \times p^2};$$

- замкнутого контура по управлению

$$W(p)_{\text{ЗАМ.К}} = \frac{1}{k_c} \times \frac{(a_c \times b_c \times T_{\text{мсэ}} \times p + 1) \times (T_{\text{мс0}} \times p + 1)}{b_c \times a_c^2 \times T_T \times T_{\text{мс0}} \times T_{\text{мсэ}}^2 \times p^4 + b_c \times a_c^2 \times T_{\text{мсэ}}^3 \times p^3 + b_c \times a_c^2 \times T_{\text{мсэ}}^2 \times p^2 + b_c \times a_c \times T_{\text{мсэ}} \times p + 1} =$$

$$= \frac{1}{0,073} \times \frac{(2 \times 10^{-2} \times 0,002792 \times p + 1) \times (0,002 \times p + 1)}{2 \times 10^{-2} \times 0,000792 \times 0,002 \times 0,002792^2 \times p^4 + 2 \times 10^{-2} \times 0,002792^3 \times p^3 + 2 \times 10^{-2} \times 0,002792^2 \times p^2 + 2 \times 10^{-2} \times 0,002792 \times p + 1}$$

;

где $T_{\text{мсэ}} = T_T + T_{\text{мс0}} = 0,000792 + 0,002 = 0,002792$ с - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Оптимизированный контур при обработке ступенчатых управляющих воздействий обеспечивает высокое быстродействие при перерегулировании в общем случае более 43%. Настройка контура без фильтров на входе близка к настройке на СО.

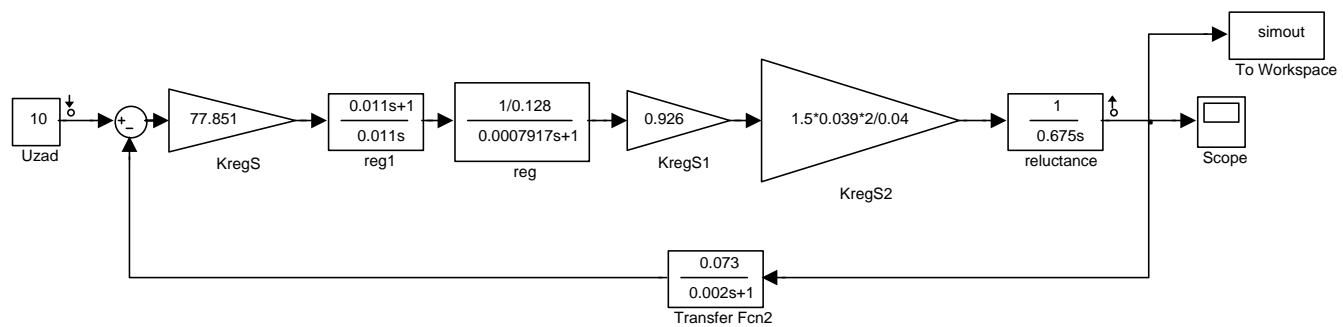


Рисунок 31 – Имитационная модель контура скорости с ПИ-регулятором (без фильтра на входе)

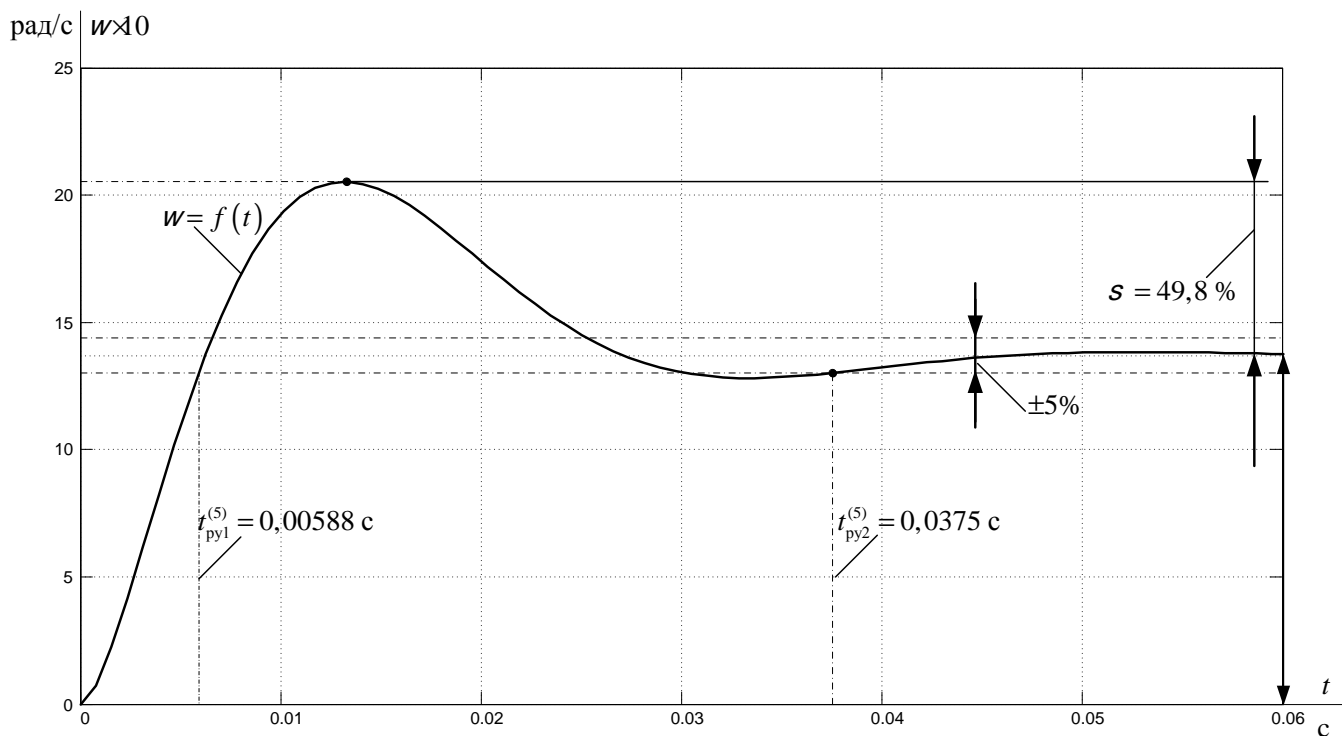


Рисунок 32 – Переходная характеристика контура скорости по имитационной модели рисунка 29.

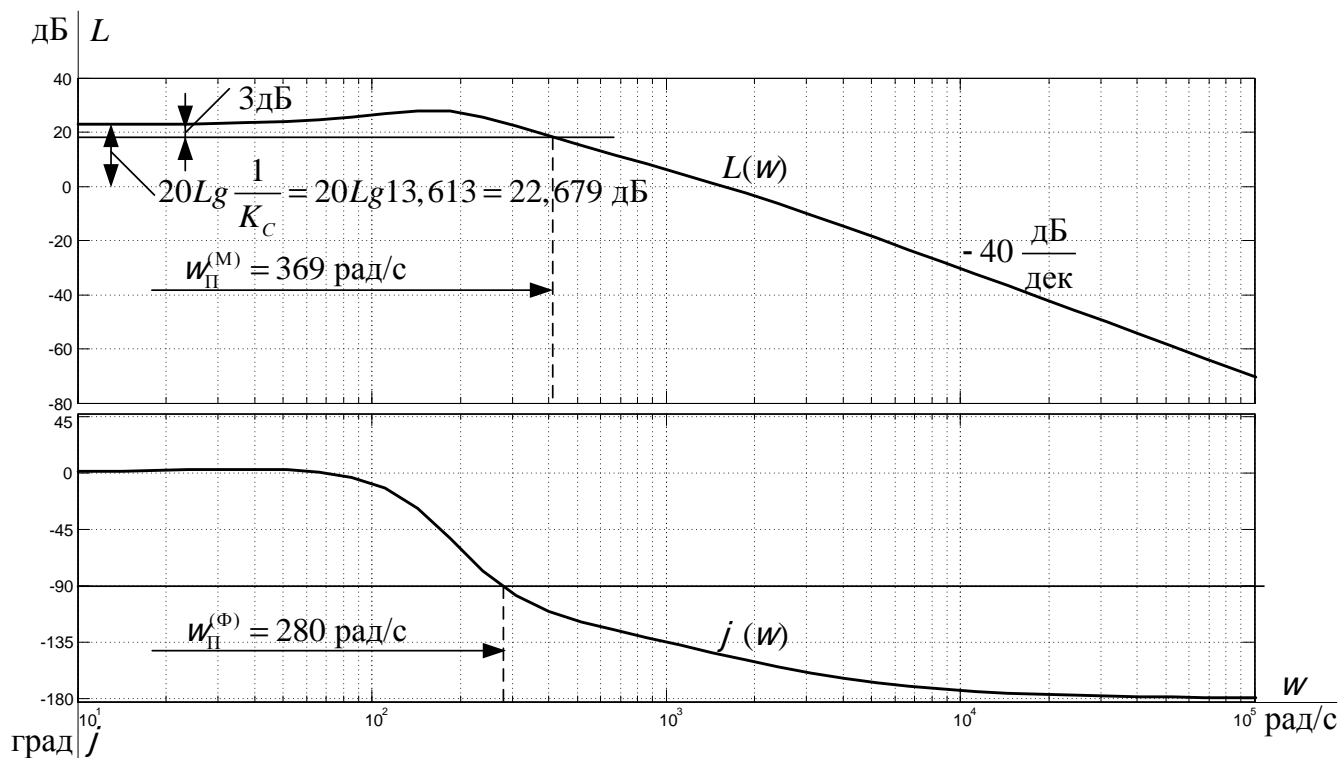


Рисунок 33 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура скорости, настроенного на СО (без фильтра на входе)

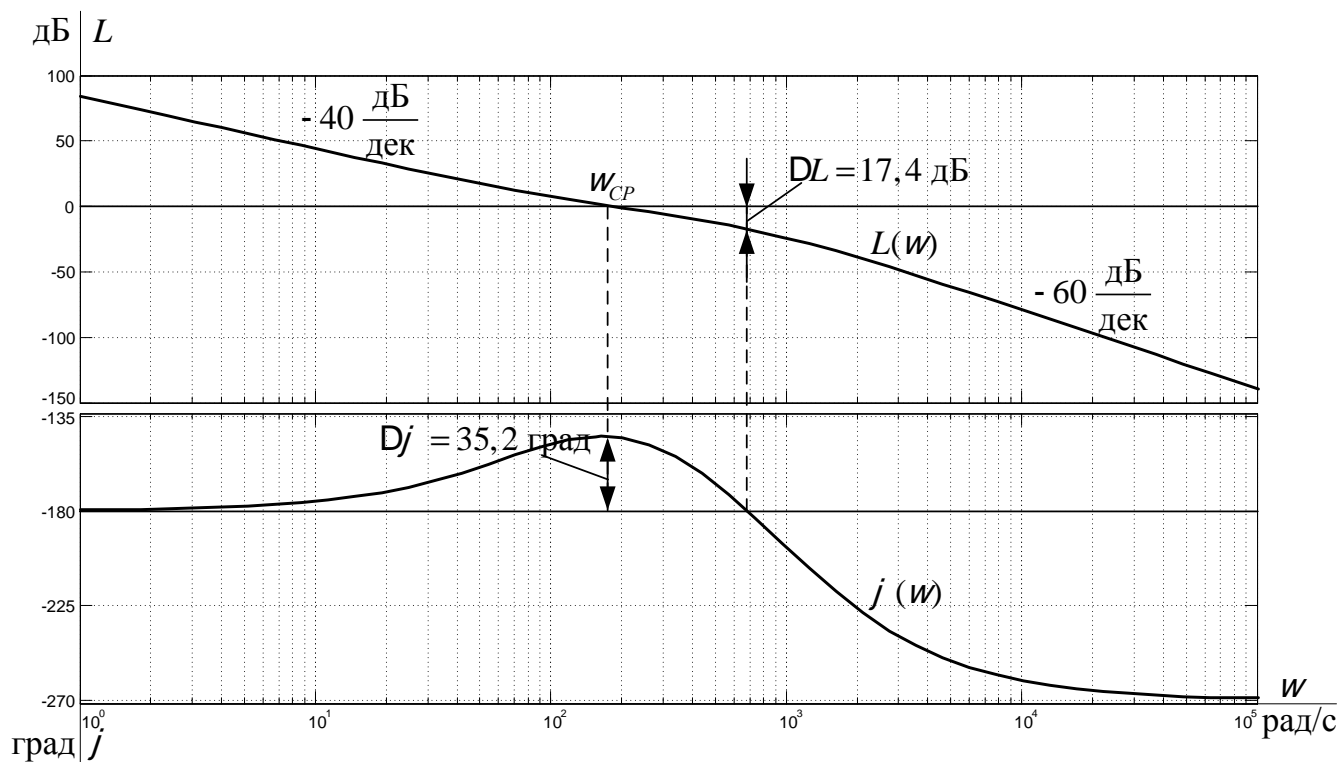


Рисунок 34 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура скорости, настроенного на СО (без фильтра на входе)

Из графиков видно, что

полоса пропускания по модулю $\omega_{\Pi}^{(M)} = 369 \text{ рад/с}$;

полоса пропускания по фазе $\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 280 \text{ рад/с}$.

Для разомкнутого контура

запас устойчивости по модулю $DL = 17,4 \text{ дБ}$;

запас устойчивости по фазе $Dj = 35,2 \text{ дБ}$.

Экспериментальные показатели качества линеаризованного контура скорости сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Показатели переходных процессов контура скорости с ПИ – регулятором (без фильтра на входе)

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$s, \%$	$Dw_{y,yct}, рад/с$
Результаты моделирования			
0,00588	0,0375	49,8	0

Для ограничения перерегулирования на уровне 8,1 % на входе контура скорости должны быть включены два одинаковых фильтра, соответственно с постоянными времени :

$$T_{\Phi.BX2} = b_c \times a_c \times (T_T + T_{mc0}) = 2 \times 2 \times (0,000792 + 0,002) = 0,013 c ; T_{\Phi.BX2} = T_{mc0} = 0,002 c .$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости по управлению с двумя фильтрами на входе имеет вид

- замкнутого контура

$$W(p)_{\text{PAC}} = \frac{1}{k_c} \times \frac{1}{b_c \times a_c^2 \times T_T \times T_{mc0} \times T_{mc}^2 \times p^4 + b_c \times a_c^2 \times T_{mc}^3 \times p^3 + b_c \times a_c^2 \times T_{mc}^2 \times p^2 + b_c \times a_c \times T_{mc} \times p + 1} =$$

$$= \frac{1}{0,073} \times \frac{1}{2 \times 2^2 \times 0,000792 \times 0,002 \times 0,002792^2 \times p^4 + 2 \times 2^2 \times 0,002792^3 \times p^3 + 2 \times 2^2 \times 0,002792^2 \times p^2 + 2 \times 2 \times 0,002792 \times p + 1}$$

где $T_{mc} = T_T + T_{mc0} = 0,000792 + 0,002 = 0,002792 c$ - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Настройка контура без фильтров на входе близка к настройке на СО, а с фильтрами на МО для системы 3-го порядка.

Контур скорости с фильтрами на входе представляет собой астатическую систему 1-го порядка и обеспечивает нулевую статическую ошибку по управлению. Динамические показатели качества работы контура зависят от соотношения малых постоянных времени $\frac{T_{mc0}}{T_T}$ и предварительно могут быть определены по выражениям:

- перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при отработке скачка задания

$$s = (8,1, 10) \% ;$$

$$t_{PY1}^{(5)} = (7,5,8) \times (T_T + T_{m\epsilon 0}) = (7,5,8) \times (0,000792 + 0,002) = 0,02,0,016 \text{ с};$$

$$t_{PY2}^{(5)} = (12,9,5) \times (T_T + T_{m\epsilon 0}) = (12,9,5) \times (0,000792 + 0,002) = 0,034,0,027 \text{ с}.$$

Для замкнутого контура

- полоса пропускания контура по модулю и по фазе изменяются в пределах

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{(0,5,0,54)}{T_T + T_{m\epsilon 0}} = \frac{(0,5,0,54)}{0,000792 + 0,002} = 179,1,193,4 \text{ рад/с};$$

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{(0,36,0,42)}{T_T + T_{m\epsilon 0}} = \frac{(0,36,0,42)}{0,000792 + 0,002} = 129,150,4 \text{ рад/с};$$

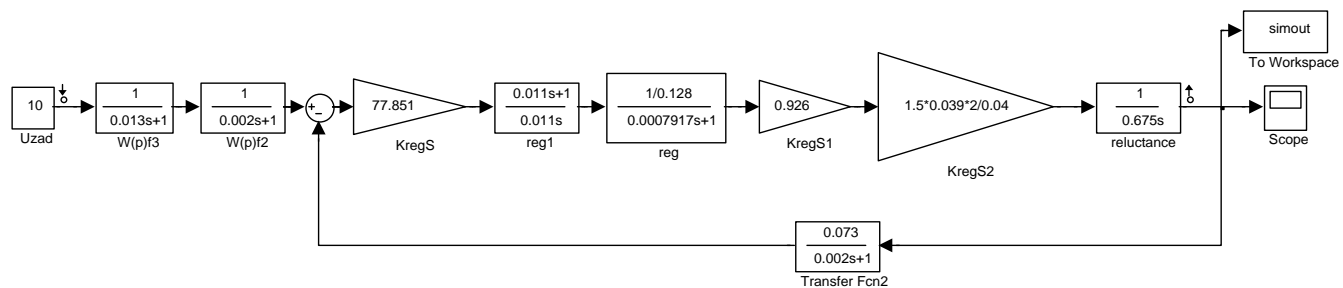


Рисунок 35 – Имитационная модель контура скорости с ПИ–регулятором в среде Simulink (с двумя фильтрами на входе)

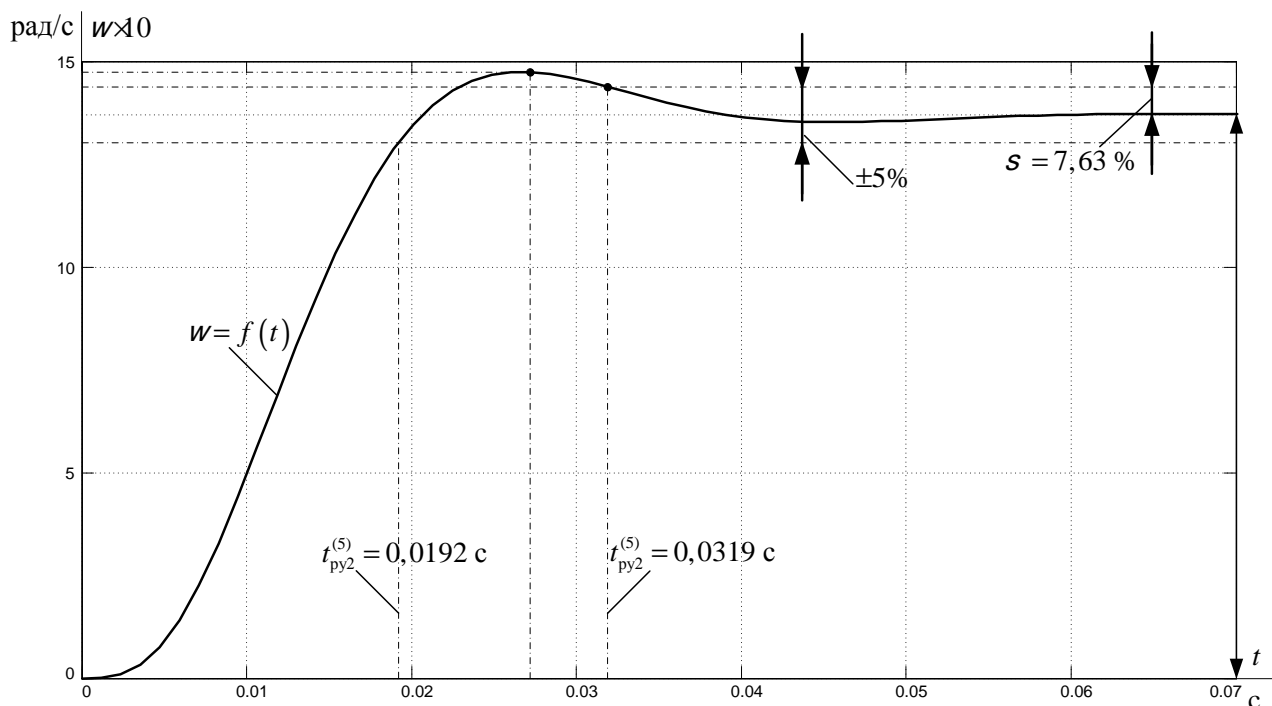


Рисунок 36 – Переходная характеристика контура скорости по имитационной модели рисунка 33

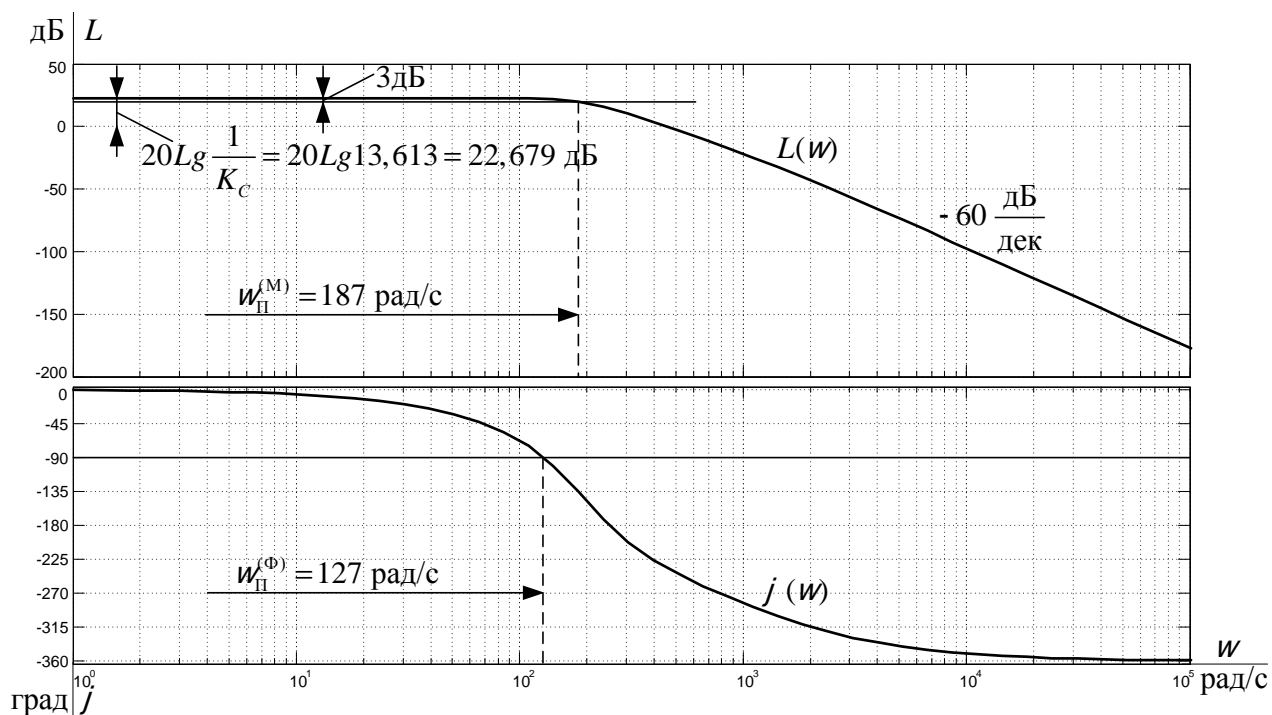


Рисунок 37 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура скорости, настроенного на МО (с двумя фильтрами на входе)

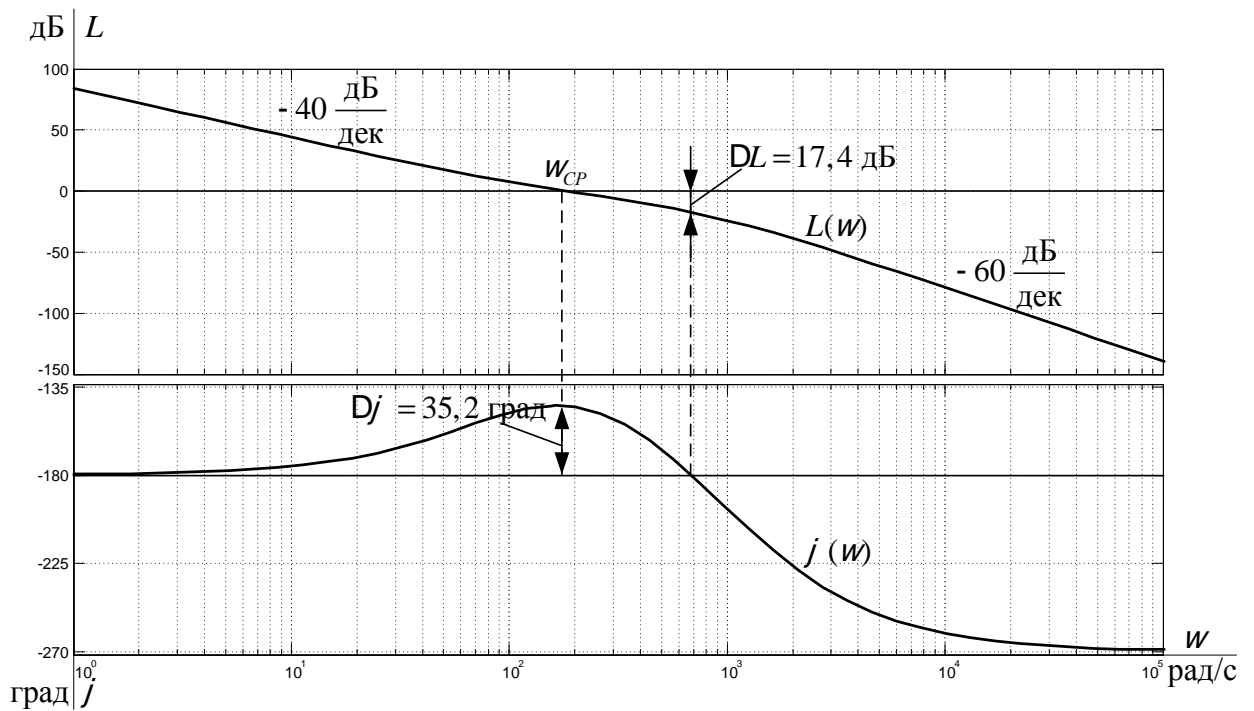


Рисунок 38 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура скорости, настроенного на МО (с двумя фильтрами на входе)

Из графиков видно, что

полоса пропускания по модулю $\omega_{\Pi}^{(M)} = 187 \text{ рад/с}$;

полоса пропускания по фазе $\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 127 \text{ рад/с}$.

Для разомкнутого контура

запас устойчивости по модулю $DL = 17,4 \text{ дБ}$;

запас устойчивости по фазе $Dj = 35,2 \text{ дБ}$.

Теоретические и экспериментальные показатели качества линеаризованного контура скорости сведены в таблицу 9.

Таблица 9 – Показатели переходных процессов контура скорости (ПИ-регулятор)

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$s, \%$	$Dw_{y,ycr}, рад/с$
Ожидаемые показатели			
0,02 , 0,016	0,034 , 0,027	(8,1 , 10)	0
Результаты моделирования			
0,0192	0,0319	7,63	0

Вывод: Так как контур скорости, оптимизированный приближенно по МО с ПИ-регулятором, является контуром четвертого порядка, с двумя входными фильтрами, поэтому полученные показатели оптимизации на модульный оптимум отличаются от предполагаемых. Полученные отклонения не значительны и входят в допустимый диапазон, следовательно контур оптимизирован верно.

3.5 Обработка контуром скорости возмущающих воздействий

Структурная схема линеаризованного контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором, при обработке возмущающего воздействия приведена на рис. 39.

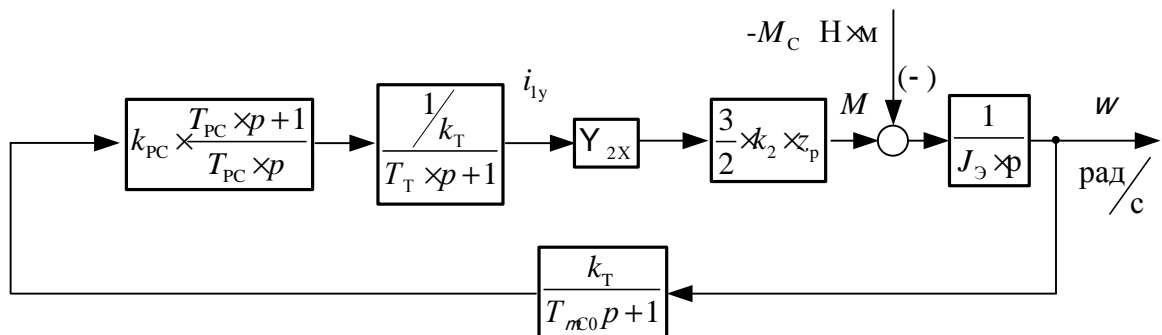


Рисунок 39 – Структурная схема линеаризованного контура скорости с ПИ-регулятором при обработке возмущающих воздействий
Передаточная функция замкнутого контура скорости по возмущению

$$W(p)_{B.3AM} = \frac{w(p)}{-M_c(p)} = \frac{\frac{1}{J_\Sigma} \times b_c \times a_c^2 \times T_{mc0}^2 \times p \times (T_T \times p + 1) \times (T_{mc0} \times p + 1)}{b_c \times a_c^2 \times T_T \times T_{mc0} \times T_{mc0}^2 \times p^4 + b_c \times a_c^2 \times T_{mc0}^3 \times p^3 + b_c \times a_c^2 \times T_{mc0}^2 \times p^2 + b_c \times a_c \times T_{mc0} \times p + 1}$$

$$\gg \frac{\frac{1}{J_\Sigma} \times b_c \times a_c^2 \times T_{mc0}^2 \times p \times (T_{mc0} \times p + 1)}{b_c \times a_c^2 \times T_{mc0}^3 \times p^3 + b_c \times a_c^2 \times T_{mc0}^2 \times p^2 + b_c \times a_c \times T_{mc0} \times p + 1}$$

$$\gg \frac{\frac{1}{0,675} \times 2 \times 2 \times 0,002792^2 \times p \times (0,002792 \times p + 1)}{2 \times 2^2 \times 0,002792^3 \times p^3 + 2 \times 2^2 \times 0,002792^2 \times p^2 + 2 \times 2 \times 0,002792 \times p + 1};$$

Оптимизированный замкнутый контур скорости с ПИ-регулятором представляет собой астатическую систему регулирования 1-го порядка по возмущению. Ожидаемые показатели качества работы контура при обработке ступенчатого возмущающего воздействия:

- установившаяся ошибка по возмущению

$$Dw_{B.YCT} = 0 \text{ рад/с};$$

динамический провал (всплеск) скорости при набросе (сбросе) нагрузки DM_c

$$Dw_{B.MAKC} \gg - \frac{1,75 \times (T_T + T_{mc0})}{J_\Sigma} \times DM_c \gg - \frac{1,75 \times (0,000792 + 0,002)}{0,195} \times 55 = -0,977 \text{ рад/с};$$

- время отработки возмущающего воздействия

$$t_{PB} \gg (12,5, 10,9) \times (T_T + T_{mc0}) \gg (12,5, 10,9) \times (0,000792 + 0,002) \gg 0,035, 0,03 \text{ с.}$$

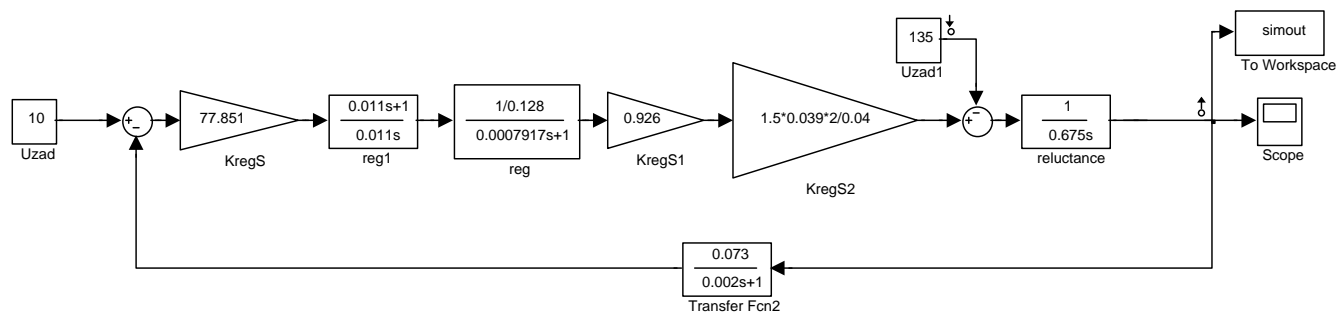


Рисунок 40 – Имитационная модель линеаризованного контура скорости с ПИ-регулятором при отработке возмущения в среде Simulink

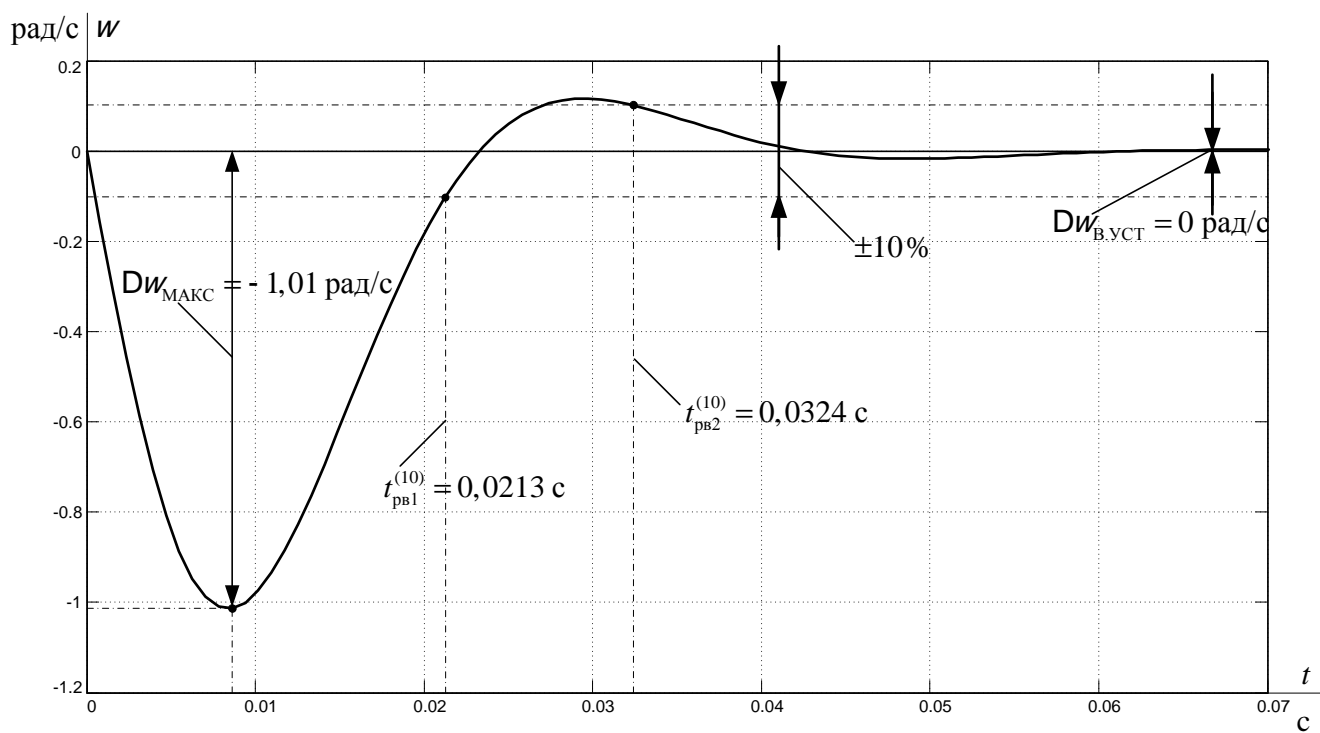


Рисунок 41 – Переходная характеристика контура скорости
по имитационной модели рисунка 40

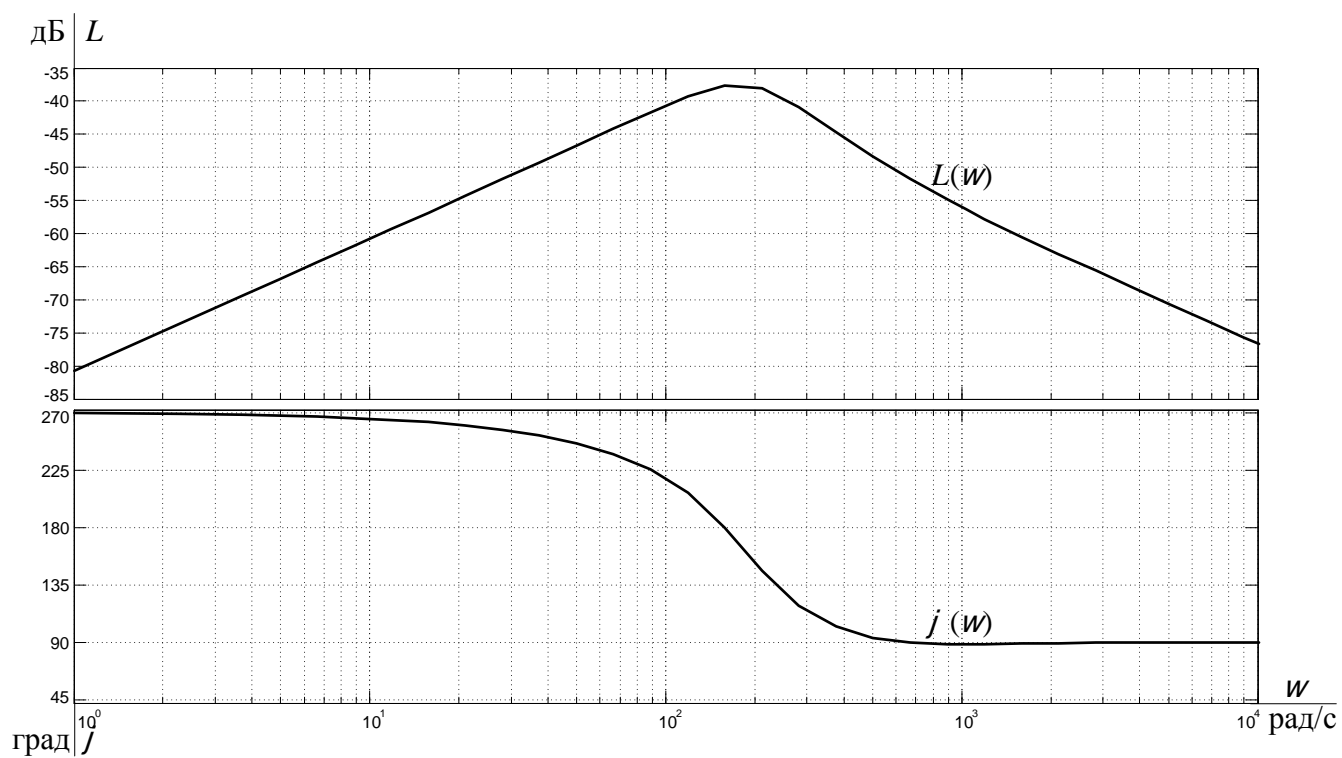


Рисунок 42 – ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутого контура скорости
при отработке возмущающего воздействия

Теоретические и экспериментальные показатели качества сведены в таблицу 10. Время переходного процесса по возмущению t_{PB} оценивается по окончательному вхождению в зону допустимых отклонений $\pm D$, где $D = 0,1 \omega_{уст}$

Таблица 10 – Показатели переходных процессов контура скорости с ПИ-регулятором

$D\omega_{B,MAX}$, рад/с ($D\dot{\omega}_N = 55 \text{ } \ddot{\omega}$)	t_{PB} , с	$D\omega_{B,уст}$, рад/с
Ожидаемые показатели качества		
-0,977	0,035÷0,03	0
Результаты моделирования		
-1,01	0,0324	0

Вывод: Логарифмические частотные характеристики замкнутого и разомкнутого контуров одинаковы. Поскольку ЛАЧХ замкнутого контура скорости по возмущению располагается в нижней полуплоскости, значит, система эффективно подавляет возмущение. Следовательно контур настроен верно.

4 НЕЛИНЕЙНАЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1 Структурная схема нелинейной САУ РЭП асинхронного электропривода с векторным управлением

Структурная схема нелинейной САУ частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 43. Структурная схемарисунка 40 составлена на основании структурной схемы линеаризованной САУ электропривода (рисунок 40) и учитывая, следующие основные нелинейности элементов системы управления электропривода:

- насыщение регулятора тока, потокосцепления и скорости

$$U_{PTMAKC} = \pm 10B, U_{PYMAKC} = \pm 10B, U_{PCMAKC} = \pm 10B;$$

- постоянное по величине ограничение максимального тока электропривода в переходных режимах и кратковременных нагрузках, которое достигается ограничением выходного напряжения регулятора скорости на уровне

$$U_{PCDOП}(w) = \pm k_T \times I_{ЭПМАКС}(w),$$

ограничение выходного напряжения инвертора $E_E = \sqrt{2} \times U_{II} = 311,1A$;

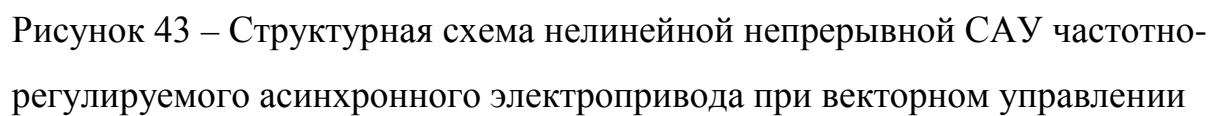
реактивный характер нагрузки $M_C(w) = M_C \times \text{sign } w$,

где величина момента изменяется от $(M_{CXX} + M_{CDВ})$ до $(M_{CMAКС} + M_{CDВ})$;

нелинейная зависимость задания потокосцепления U_{CY} во второй зоне регулирования скорости от величины задания скорости $U_{ЗС}$.

Исследование на имитационной модели нелинейной САУ электропривода (рисунок 41) проводятся с целью оценки влияния величины задания скорости $U_{ЗС}$ и момента M_C на характер переходных процессов и динамические показатели качества работы электропривода с учетом ограничения выходных напряжений регуляторов и преобразователя частоты.

По результатам имитационных исследований могут быть внесены изменения в настройку контуров регулирования САУ электропривода, введены корректирующие цепи или выбраны компромиссные настройки с учетом изменяющихся параметров силовой части электропривода, например, момента инерции, потокосцепления и т. д.



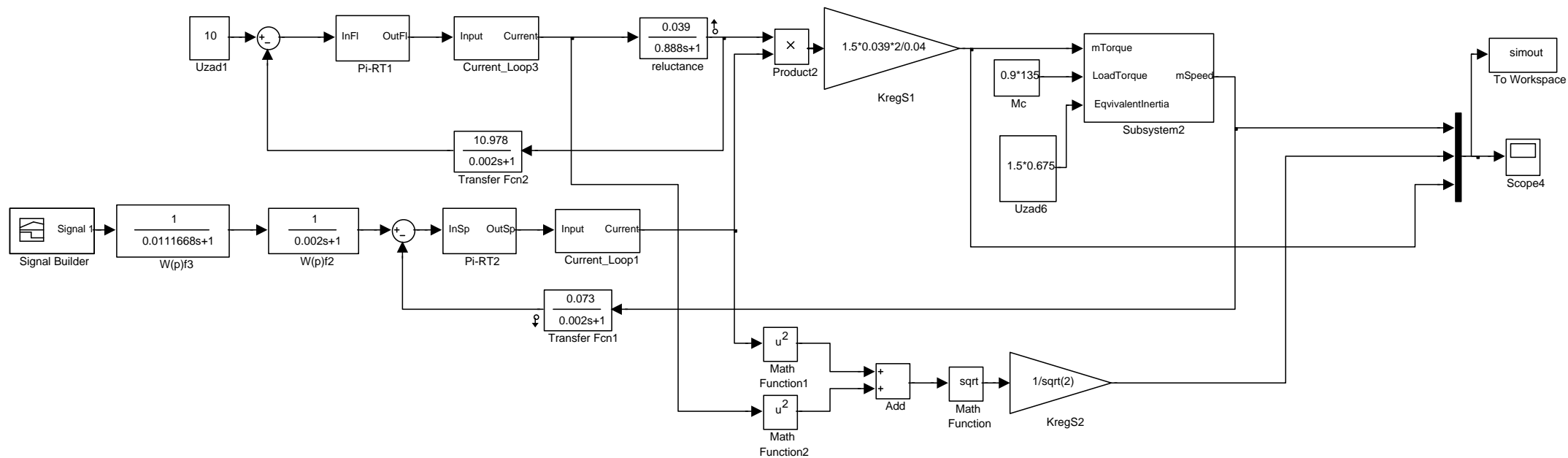
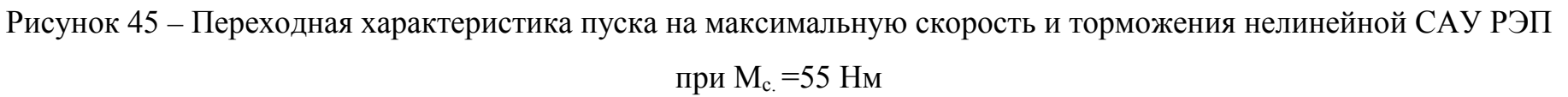


Рисунок 44 – Имитационная модель нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении



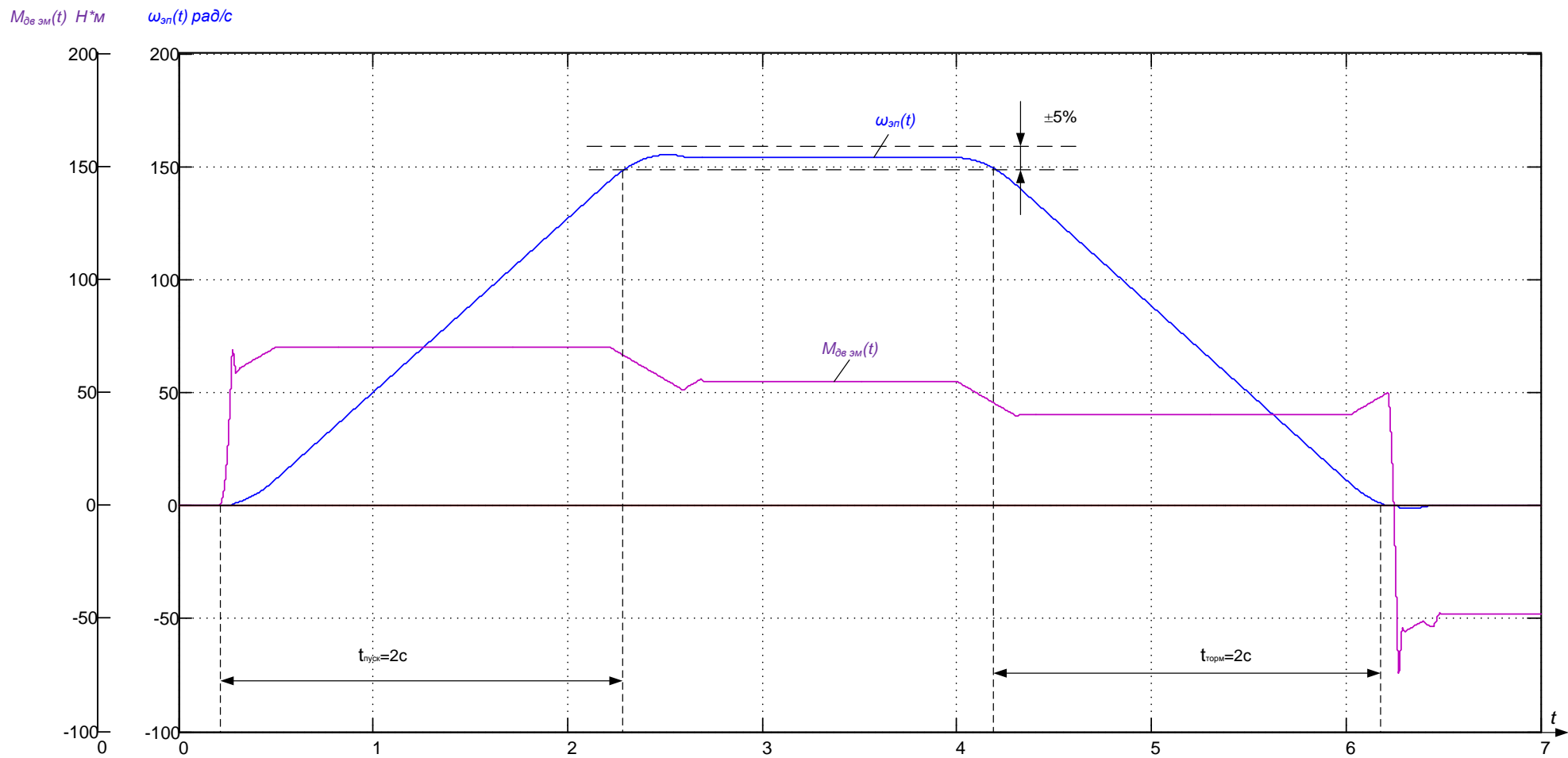


Рисунок 46 – Переходная характеристика пуска на максимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55$ Нм с задатчиком интенсивности.

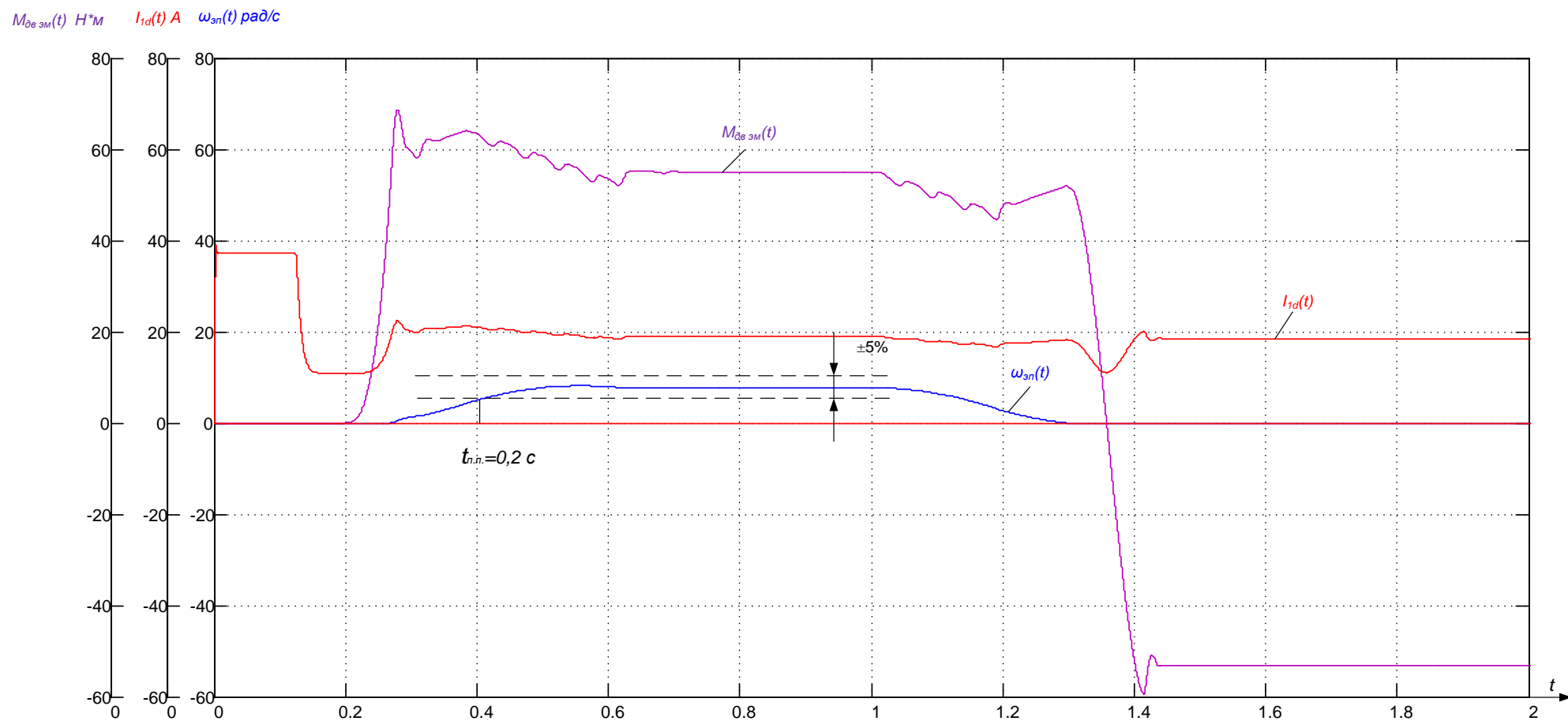


Рисунок 47 – Переходная характеристика пуска на минимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с задатчиком интенсивности.

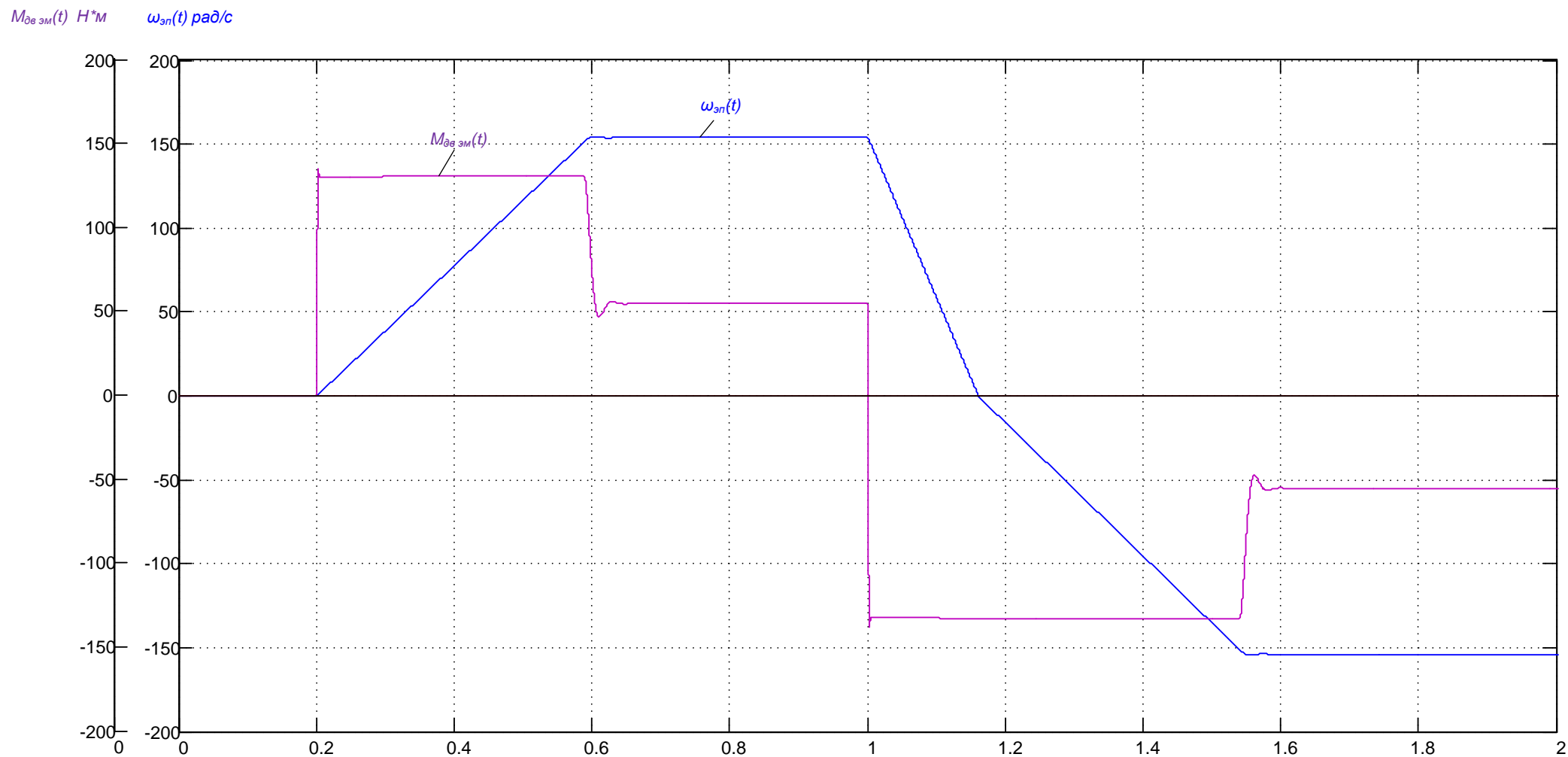


Рисунок 48 – Переходная характеристика реверсана максимальную скорость нелинейной САУ РЭП
при $M_c = 55$ Нм с.

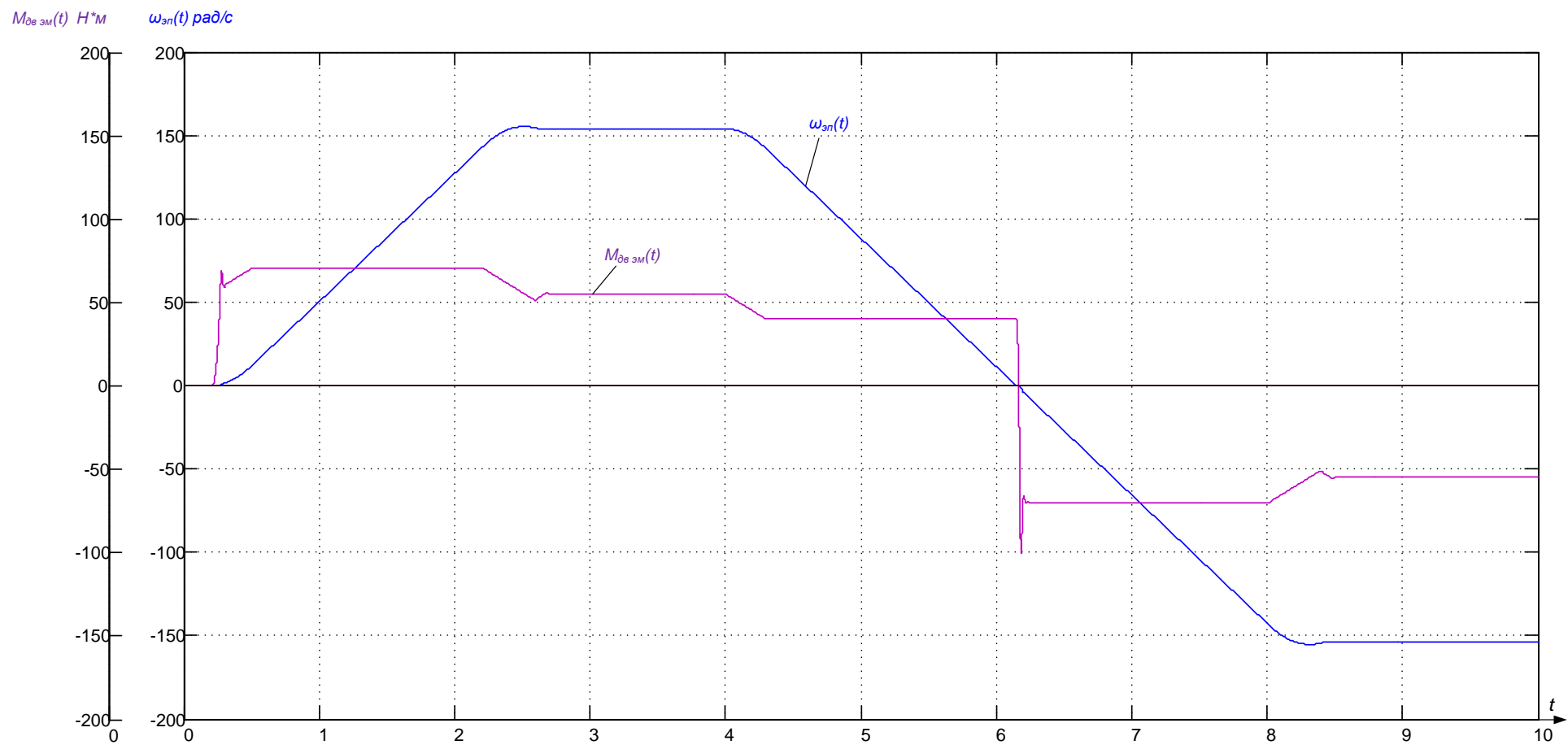


Рисунок 49 – Переходная характеристика реверсана максимальной скорость нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с задатчиком интенсивности.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Группа	ФИО
З-5Г3А1	Маленко Максим Тимофеевич

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:	
1. Стоимость затрат технического проекта (ТП)	Затраты на Материальные затраты определяются согласно прейскурантам. Заработная плата определяется исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион. Страховые отчисления определяются согласно Федеральному закону от 24.07.2009 №212-ФЗ.
2. Продолжительность выполнения ТП	По приблизительной оценке, продолжительность ТП составляет 106 рабочих день
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Оценка потенциала и перспективности реализации технического проекта (ТП) с позиции ресурсоэффективности	Потенциал и перспективность реализации ТП оценивается проведением SWOT-анализа, а ресурсоэффективность ТП с помощью интегральной оценки ресурсоэффективности.
2. Планирование графика работ по реализации ТП	При составлении графика работ по реализации ТП используется оценка трудоемкости работ для каждого исполнителя. По полученным данным составляется ленточная диаграмма Ганта.
3. Составление сметы ТП	При составлении сметы ТП используется следующая группировка затрат по статьям: - затраты на оборудование; - полная заработная плата исполнителей; - отчисления во внебюджетные страховые фонды; - накладные расходы .
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей);	
Диаграмма Ганта	
Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	30.04.2019 г.

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян Мария Вигеновна	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5Г4Б1	Прокопьев Сергей Валерьевич		

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Целью данного раздела является обоснование целесообразности проектирования и создания технологического проекта, выполняемого в рамках выпускной квалификационной работы, при этом рассматриваются планово-временные и материальные показатели процесса проектирования. В данном разделе производится расчет суммы затрат на проектирование частотно-регулируемого электропривода механизма передвижения телеги козлового крана и сумма затрат на покупку оборудования для реализации проекта.

Достижение цели обеспечивается решением задач:

- оценка технологического проекта при помощи SWOT-анализа;
- расчет затрат на проведение проектной работы;
- планирование проектно-конструкторских работ;
- определение ресурсосберегающей эффективности проекта.

5.1 SWOT-анализ электропривода козлового крана ЛТ-62

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента. Он представляет собой комплексное исследование технического проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта. [17.]

Для проведения SWOT-анализа составляется матрица SWOT, в которую записываются слабые и сильные стороны проекта, а также возможности и угрозы.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения: С – сильные стороны проекта; Сл – слабые стороны проекта; В – возможности; У – угрозы.

Матрица SWOT приведена в таблице 5.1.

Таблица 5.1. Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта: С1. Высокая энергоэффективность и энергосбережение технологии С2. Экологичность технологии С3. Повышение безопасности производства С4. Большая экономия электрической энергии С5. Снижение затрат на содержание и обслуживание	Слабые стороны проекта: Сл1. Высокая цена на оборудование и комплектующие Сл2. Отсутствие квалифицированного персонала Сл3. Большой срок поставки оборудования и комплектующих
Возможности: В1. Автоматизация технологического процесса В2. Энерго и ресурсосбережение В3. Сокращение рабочих площадей В4. Повышение износостойкости элементов и деталей электропривода	В1 С1С2С3С4С5 В2 С1С3С4С5 В3 С2С3С5 В4 С1С2С4С5	В1 Сл1Сл2Сл3 В2 Сл1Сл3 В3 Сл2 В4 Сл1Сл3
Угрозы: У1. Отсутствие спроса на технологию производства У2. Развитая конкуренция технологии производства У3. Введение дополнительных государственных требований к стандартизации и сертификации продукции У4. Риск несвоевременной поставки оборудования	У1 С5 У2 С5	У1 Сл3 У2 Сл3 У3 Сл2 У4 Сл3

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются следующие обозначения:

«+» - сильное соответствие;

«-» - слабое соответствие.

Анализ интерактивных таблиц приведен в таблицах 5.2 и 5.3.

Таблица 5.2. Интерактивная матрица возможностей.

Сильные стороны проекта					
Возможности	C1	C2	C3	C4	C5
B1	+	+	+	+	+
B2	+	-	+	+	+
B3	-	+	+	-	+
B4	+	+	-	+	+
Слабые стороны проекта					
Возможности	Сл1	Сл2	Сл3	-	-
B1	+	+	+		
B2	+	-	+		
B3	-	+	-		
B4	+	-	+		

Таблица 5.3. Интерактивная матрица угроз

Сильные стороны проекта					
Угрозы	C1	C2	C3	C4	C5
У1	-	-	-	-	+
У2	-	-	-	-	+
У3	-	-	-	-	-
У4	-	-	-	-	-
Слабые стороны проекта					
Угрозы	Сл1	Сл2	Сл3	-	-
У1	-	-	+		
У2	-	-	+		
У3	-	+	-		
У4	-	-	+		

В результате проведения SWOT-анализа были рассмотрены сильные и слабые стороны технического проекта, оказалось, что самой сильной стороной проекта является большая экономия потребляемой электрической энергии, так как электропривод позволяет двигателю работать при разном питающем напряжении, в зависимости от нагрузки. Кроме того, вследствие автоматизации технологического процесса повышается безопасность производства. Как слабую сторону проекта, можно отметить рост конкуренции, появление схожих технологий.

Анализ интерактивных матриц, приведенных в таблицах 5.2 и 5.3, показывает соответствие сильных сторон с возможностями, нежели с угрозами. Кроме того, угрозы имеют низкие вероятности, что говорит о высокой надежности проекта.

5.2 Структура работ технического проекта

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- Определение структуры работ в рамках технического проектирования;
- Определение участников каждой работы;
- Установление продолжительности работ;

Построение графика проведения проектирования системы

Таблица 5.4. Перечень этапов работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ работы	Содержание работ	Исполнитель
Составление технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления технического проектирования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник
Теоретические и экспериментальные исследования	3	Выбор оборудования	Дипломник
	4	Расчет элементов электропривода	Дипломник
	5	Построение естественных и искусственных характеристик	Дипломник
	6	Проверка правильности выбора оборудования	Руководитель, Дипломник
	7	Расчет и проверка модели АД	Руководитель, Дипломник
	8	Расчет и проверка модели АД-ПЧ	Руководитель, Дипломник
Оформление отчета по техническому проектированию и защита ВКР	9	Составление пояснительной записки	Дипломник
	10	Проверка и защита выпускной квалификационной работы	Руководитель, Дипломник

5.2.1. Структура работ в рамках технического проектирования

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Каждый вид запланированных работ закреплен за соответствующим исполнителем.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 5.4.

Для выполнения проектирования формируется рабочая группа, в состав которой входят научный руководитель и дипломник. Составлен перечень этапов и работ в рамках проведения проектирования и произведено распределение исполнителей по видам работ.

Номерам этапов соответствуют следующие виды выполняемых работ, представленные в таблице 5.4.:

№1 - составление и утверждение технического задания – выбор направления исследований научным руководителем и составление плана работ;

№2 - Подбор и изучение материалов по теме – ознакомление с предметом работы, изучение первичных источников информации об объекте исследования;

№3 - Выбор оборудования – расчет мощности электропривода и его выбор по номенклатуре, также выбор преобразователя частоты ;

№4 – Расчет элементов электропривода - определение параметров схемы замещения асинхронного электродвигателя;

№5 – Построение естественных и искусственных характеристик – расчет и построение естественных и искусственных механических и электромеханических характеристик электродвигателя;

№6 - Проверка правильности выбора оборудования – проверка руководителем правильности выбора оборудования, оценка результатов, устранение недочетов;

№7 - Расчет и проверка модели АД – построение естественных механических и электромеханических характеристик в среде MATLAB при пуске под нагрузкой;

№8 - Расчет и проверка модели АД-ПЧ – расчет статических характеристик системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель, расчет и построение семейства механических и электромеханических характеристик асинхронного двигателя при изменении частоты подаваемого напряжения в среде MATLAB.

№9 - Составление пояснительной записки - оформление результатов проектной деятельности;

№10 - Проверка и защита выпускной квалификационной работы - окончательная проверка руководителем, устранение недочетов дипломником, подготовка презентации, размещение пояснительной записки в электронно-библиотечной системе ТПУ, защита выпускной квалификационной работы.

5.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения ожидаемого значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула.[17]

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

t_{mini} – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

t_{maxi} – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Результаты продолжительности выполнения работ приведены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Календарная продолжительность работ

№	Название работы	Трудоёмкость работ					
		Минимально возможная трудоемкость		Максимально возможная трудоемкость		Ожидаемая трудоемкость	
		Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник	Науч. рук-ль	Дипломник
1	Составление и утверждение технического задания	1	-	1	-	1	-
2	Подбор и изучение материалов по теме	-	8	-	10	-	9
3	Расчет и выбор двигателя	-	24	-	28	-	27
4	Расчет механических и эксплуатационных характеристик двигателя	1	25	1	32	1	28
5	Расчет силовой части преобразователя частоты	1	20	1	24	1	22
6	Оценка эффективности полученных результатов	1	3	1	7	1	5
7	Составление пояснительной записки	-	7	-	14	-	10
8	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	1	-	1	-	1	-
9	Сдача и защита выпускной квалификационной работы	2	4	2	6	2	5

Исходя из составленной диаграммы, можно сделать вывод, что продолжительность работ занимает 12 декад, начиная со второй декады февраля, заканчивая первой декадой июня. Продолжительность выполнения технического проекта составит 108 дней. Из них:

106 дней – продолжительность выполнения работ дипломника;

7 дней – продолжительность выполнения работ руководителя;

Таблица 5.6– Диаграмма Ганта

№	Вид работ	Исп-ли	T_{pib} раб. дн.	Продолжительность выполнения работ											
				Февр.		Март			Апрель			Май			Июнь
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	-											
2	Подбор и изучение материалов по теме	Дипломник	9	-											
3	Расчет и выбор двигателя	Дипломник	27		-	-	-								
4	Расчет механических и эксплуатационных характеристик двигателя	Руководитель	1							-					
		Дипломник	28					-	-	-					
5	Расчет силовой части преобразователя частоты	Руководитель	1									-			
		Дипломник	22								-	-	-		
6	Оценка эффективности полученных результатов	Руководитель	1										-		
		Дипломник	5										-		
7	Составление пояснительной записки	Дипломник	10											-	
8	Проверка выпускной квалификационной работы руководителем	Руководитель	1											-	
9	Сдача и защита выпускной квалификационной работы	Руководитель	2												-
		Дипломник	5												-

5.3 составление сметы технического проекта

При планировании сметы технического проекта (ТП) должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования сметы ТП используется группировка затрат по следующим статьям:

- затраты на специальное оборудование;
- полная заработная плата исполнителей ТП;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

Материальные затраты на комплектующие, провода, шлейфы и т.д. не рассчитываются, так как они укомплектованы вместе с оборудованием.

5.3.1. Расчет материальных затрат

В материальные затраты включаются затраты на канцелярские принадлежности, информационные носители (флеш-карты), картриджи и т.п.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле: []

$$Z_m = \sum_{i=1}^m C_i \times N_{расх\ i},$$

где m – количество видов материальных ресурсов;

$N_{расх\ i}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию (натур.ед.);

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./натур.ед.);

Значения цен на материальные ресурсы установлены по данным, размещенным на сайте канцелярского магазина ТД „Канцелярский мир”.

Привлечение сторонней организации „Pechat 24” для типографических работ.

Таблица 5.7. – Материальные затраты

Наименование	Количество	Цена за ед., руб.	Затраты на материалы, руб.
Упаковка бумаги	1	320	320
Ручка	2	60	120
Папка	1	60	60
Степлер	1	130	130
Калькулятор	1	570	570
Итого			1200

5.3.2 Полная заработная плата исполнителей

В этом разделе рассчитывается основная и дополнительная заработная плата всех исполнителей, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок.

Полная заработная плата рассчитывается по формуле: [19]

$$З_{полн} = З_{осн} + З_{доп}$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата, руб.;

$З_{доп}$ – дополнительная заработная плата, руб.

Основная заработная плата исполнителей рассчитывается по формуле: [19]

$$З_{осн} = З_{дн} \cdot Тр$$

где $З_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.;

$Тр$ – продолжительность работ, выполняемых работником, раб. дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле: [19]

$$З_{дн} = \frac{З_{тс} + З_{р.к.}}{F_{д}}$$

где $Z_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$Z_{р.к.}$ – доплата с учетом районного коэффициента (30 %), руб.;

$F_{д}$ – количество рабочих дней в месяце (26 при 6 – дневной рабочей неделе), раб. дн.

Расчет основной заработной платы приведен в таблице 5.8.

Исполнители	Оклад, руб.	Месячная зарплата, руб.	Среднедневная заработная плата, руб.	Кол-во дней	Основная заработная плата руб.
Руководитель	33 664	43 763	1 683	7	11781
Дипломник	12 300	15 990	615	106	65190

Дополнительная заработная плата составляет 12 – 15% от основной, расчет дополнительной и полной заработной платы приведен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Расчет дополнительной и полной заработной платы

Исполнители	Коэф. доплаты	Основная заработная плата руб	Дополнительная заработная плата руб	Полная заработная плата, руб.
Руководитель	0,15	11781	1767	13600
Дипломник	0,12	65190	7823	73000
Итого		76971	9590	86600

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:[19]

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}}$$

5.3.3 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам

государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы: [17]

$$З_{внеб} = З_{осн} + З_{доп}$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

В соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30,2 %.

Отчисления во внебюджетные страховые фонды составят:

$$З_{внеб} = 0,302 \cdot 86,6 = 26,2 \text{ тыс. руб.}$$

5.3.4. Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не включенные в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергии, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Величина коэффициента накладных расходов принимается в размере 16% от общих затрат.

5.4. Формирование сметы затрат технического проекта

Рассчитанная величина затрат технического проекта является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при заключении договора с заказчиком защищается организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку технической продукции

Определение бюджета затрат

на технический проект приведен в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Смета затрат технического проекта.

Наименование статьи	Сумма, тыс. руб.	Структура затрат, %
1. Материальные затраты ТП	1,2	0,9
2. Затраты по полной заработной плате исполнителей темы	86,6	64,0
3. Отчисления во внебюджетные фонды	26,2	19,1
4. Накладные расходы	22,0	16,0
5. Итого	137,0	100,0

В ходе выполнения данного параграфа была рассчитана продолжительность выполнения технического проекта, которая составляет 106 раб. дней для инженера и 7 для руководителя. Составлен календарный график выполнения работ. Смета затрат на разработку технического проекта составляет 137000 руб, из которых более половины (64,%) составляют затраты на оплату труда. Все результаты проекта оказались ожидаемы и могут быть реализованы.

4.5. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение ресурсоэффективности проекта можно оценить с помощью интегрального критерия ресурсоэффективности: [19]

$$I_{pi} = \sum a_i \times b_i$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;
 a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

Для оценки ресурсоэффективности проекта были подобраны критерии эффективности такие как:

- повышение производительности труда пользователя осуществляется путем автоматизации технологического процесса;
- удобство в эксплуатации (соответствует требованиям потребителей) –

возможность диспетчеризации позволяет сократить количество осмотров системы за период эксплуатации;

- энергоэкономичность – применение в установке тележки частотно-регулируемого электропривода дает возможность сократить расход электроэнергии крана за счет малых пусковых токов и потребляемой электроэнергии;

- надежность – осуществить разгон и торможение двигателя плавно, по линейному закону от времени, при времени разгона и времени торможения от долей секунды до 50 минут;

- уровень шума – применение частотно-регулируемого электропривода значительно снижает уровень шума за счет плавных пусковых токов снижается вибрация козлового крана;

- безопасность – нет необходимости постоянного присутствия обслуживающего персонала, так как управление и мониторинг за работой подъемного механизма осуществляется дистанционно.

Критерии ресурсоэффективности и их количественные характеристики

приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 – Сравнительная оценка характеристик проекта.

Критерии	Весовой коэффициент	Балльная оценка разработки
1. Безопасность	0,15	4
2. Удобство эксплуатации	0,10	4
3. Помехоустойчивость	0,15	5
4. Энергосбережение	0,20	5
5. Надежность	0,20	5
6. Материалоёмкость	0,20	5
Итого:	1,00	

Интегральный показатель ресурсоэффективности:

$$I_{p-учн1} = 4 \times 0,15 + 4 \times 0,1 + 5 \times 0,15 + 5 \times 0,2 + 5 \times 0,2 + 5 \times 0,2 = 4,75$$

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет достаточно высокое значение (по 5-балльной шкале) 4,75, что говорит об эффективности использования технического проекта. Высокие баллы надежности и помехоустойчивости позволяют судить о надежности системы.

В данном разделе выпускной квалификационной работы были рассмотрены, раскрыты и рассчитаны следующие вопросы:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены как сильные, так и слабые стороны технического проекта. В таких случаях используют интерактивные матрицы возможностей и угроз. Анализ данных матрицы, установил, что соответствия угроз с сильными и слабыми сторонами имеют низкую вероятность, что нельзя сказать о возможностях. В итоге следует, что данный технический проект имеет несколько важных преимуществ, таких как высокая безопасность производства и энергоэффективность, которые обеспечат повышение производительности, безопасности и экономичности технического производства;

- при планировании технических работ была составлена ленточная диаграмма Ганта. Данная диаграмма позволяет оптимально спланировать время работы исполнителей проекта (руководителя и дипломника);

- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта. По этим данным можно определить, стоит ли проводить дополнительные мероприятия по оптимизации затрат на проект или нет;

- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала довольно высокий результат (4,75 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
35Г4Б1	Прокопьев Сергей Валерьевич

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение школы (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавр	Направление	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования.	Область исследования является – электропривод тележки моста, козлового крана.
---	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.	Рассмотреть специальные правовые нормы трудового законодательства, организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.
2. Производственная безопасность 2.1. Анализ потенциально возможных вредных и опасных факторов проектируемой производственной среды. 2.2. Разработка мероприятий по снижению воздействия вредных и опасных факторов	Проанализировать потенциально возможные вредные и опасные факторы при разработке и эксплуатации оборудования: <ul style="list-style-type: none"> - Микроклимат - повышенный уровень шума и вибрации на рабочем месте - Недостаточная освещенность рабочей зоны - Механические травмы - Поражение электрическим током
3. Экологическая безопасность	<ul style="list-style-type: none"> - анализ воздействия объекта на литосферу - решение по обеспечению экологической безопасности.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<ul style="list-style-type: none"> - Анализ возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; - выбор наиболее типичной ЧС; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.

	- Пожаровзрывоопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель отделения общетехнических дисциплин	Гуляев Милий Всеволодович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
35Г4Б1	Прокопьев Сергей Валерьевич		

6. Социальная ответственность

Введение.

Безопасность жизнедеятельности (БЖД) представляет собой область научных знаний, охватывающих теорию и практику защиты человека от опасных и вредных факторов в среде обитания, во всех сферах человеческой деятельности, в том числе и на производстве.

Козловой кран предназначен для разгрузки хлыстов или деревьев с лесовозного транспорта, при создании запасов на нижних складах леспромхозов, для подачи их к раскряжёвочным агрегатам, а также для погрузки на лесовозный транспорт и других погрузо-разгрузочных работ.

6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.

6.1.1. Специальные правовые нормы трудового законодательства

Обеспечение безопасности на рабочем месте подразумевает собой различные правовые и организационные решения. Для осуществления практической деятельности в области обеспечения безопасности жизнедеятельности необходимо соблюдение нормативов и правил ведения соответствующих работ, позволяющие их обеспечить. Соблюдение рабочего режима, правил ведения работ и т.д.

При решении организационных вопросов следует учитывать антрометрические данные работника.

В течение рабочего дня (смены) работникам в соответствии со ст. 108 [12] предоставляется перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается. Такой перерыв получил название "перерыв на обед", или "обеденный перерыв".

6.1.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей

зоны

К работе машинистом козлового крана допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование, проверку знаний требований охраны труда в установленном порядке и получившие допуск к самостоятельной работе.

Рабочее место должно быть организовано в соответствии с требованиями стандартов и должно обеспечивать выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Организация рабочего места и конструкция оборудования должны обеспечивать прямое и свободное положение тела работающего или наклон его вперёд не более 15°.

Машинист козлового крана должен:

- убедиться в наличии инвентаря, инструмента и средств защиты (диэлектрических ковриков, галош, перчаток);
- проверить наличие смазки механизмов и в случае необходимости произвести их смазку;
- убедиться в отсутствии на кране и подкрановых путях ремонтного персонала или посторонних лиц, лишних предметов, которые при движении могут упасть вниз;
- получить ключ-марку, включающий электрическую цепь управления краном;
- получить разрешение на работу краном от лица, ответственного за безопасное производство работ кранами;
- после осмотра крана произвести опробование механизмов на холостом ходу без груза;
- ознакомиться с порядком и габаритами складировемого груза, с условиями производства работ.

6.2. Производственная безопасность.

6.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Грузоподъёмный кран ЛТ-62 в соответствии с Федеральным законом 116 ФЗ относится к опасным производственным объектам. Наиболее травмоопасными факторами являются механические и электрические.

Опасные и вредные производственные факторы [1] подразделяются на следующие группы: физические, химические, биологические, психофизиологические.

К опасным физическим производственным факторам на кранах относятся: движущиеся части механизмов, механизмы подъёма и передвижения, перемещаемые грузы. К вредным производственным факторам относятся: повышенная или пониженная температура рабочей зоны; высокая скорость движения воздуха (например, 15м/с); влажность воздуха, недостаточная освещённость рабочих мест, проходов и проездов.

Исследуемый электропривод работает в помещении тележки моста, которое можно характеризовать как помещение особо опасное, вследствие наличия двух условий, создающих повышенную опасность:

- сырости или проводящей пыли;
- токопроводящих полов.

6.2.1 Микроклимат рабочей зоны

Неблагоприятные условия окружающей среды вредно воздействуют на организм работающего, снижают реакцию, повышают утомленность. К таким условиям относятся:

- неблагоприятный микроклимат;
- производственные пыли;
- вредные газы и пары;
- недостаточная освещенность.

Для обеспечения санитарно — гигиенических условий на рабочем месте и обеспечения требований нормативных документов к выявленным вредным факторам, предусмотрены такие технические устройства, как вентиляция помещения с фильтрацией воздуха, системы отопления и освещения, изоляции токопроводящих полов. Категория выполняемых работ по [11] - П б.

К категории Пб (средней тяжести физические работы) относятся; работы, связанные с ходьбой, перемещением и переноской тяжести до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим напряжением.

Для данной категории работ микроклимат производственного помещения характеризуется следующими показателями:

- температура воздуха $15^{\circ} \div 27^{\circ} \text{C}$ - холодный период года, $16^{\circ} \div 27^{\circ} \text{C}$ - в теплый период года;
- влажность воздуха $40 \div 60 \%$;
- скорость движения воздуха $0,2 \div 0,3 \text{ м/с}$

Система вентиляции - механическая, приточно-вытяжная. Она обеспечивает выполнение данных требований.

Система отопления электрическая: на стенах установлены электрические печи, работающие в системе с тепловым реле.

Площадь помещения удовлетворяет требованиям, то есть более $4,5 \text{ м}^2$ на одного человека.

6.2.2 Защита от шума и вибрации

Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом, — это работа электроприводов крана.

Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается

шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности.

Длительное воздействие вибрации на организм человека приводит к серьезным последствиям под названием «вибрационная болезнь». Это профессиональная патология, которая возникает в результате длительного влияния на организм человека производственной вибрации, превышающей предельно допустимый уровень.

Для защиты от шума и вибрации по [6] предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты по ГОСТ 12.4.011 – 89;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

6.2.3 Производственное освещение

Согласно [15] прием при производстве работ на кране следующие показатели:

- характеристика работ - средней точности;
- разряд зрительной работы - 1У в (наименьший размер объекта различения 1 мм);
- освещенность искусственного освещения - 200 лк при общем освещении.

Помещение, в котором производятся работы, не является помещением с постоянным пребыванием людей, поэтому естественное освещение не нормируется.

6.3 Электробезопасность

Анализ электротравматизма показывает, что большинство несчастных случаев с работниками, обслуживающими электроустановки, происходит в результате потери им ориентировки при осмотрах, ремонтах и испытании. Электрические блокировки являются наиболее надёжным средством защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током. Они препятствуют доступу работающих к токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением. Ограничители так же как электрические блокировки, служат для защиты людей и оборудования при неправильных действиях в процессе работы. Сигнализация является средством, позволяющим работникам ориентироваться в случае аварийной ситуации и принять необходимые меры предосторожности. На кранах обычно применяют звуковую сигнализацию, срабатывающую при сильном ветре. защиты от травмоопасных и вредных производственных факторов на козловом кране являются приборы и устройства безопасности: ограничители грузоподъёмности – осуществляют ограничение грузоподъёмности при помощи конечных выключателей типа ВК-300А, установленных на ограничителях, см. рис.1.; ограничители крайнего верхнего положения траверсы – осуществляют два конечных выключателя типа ВУ-250М или четыре ВПК-1110, соединёнными с валами грузовых лебёдок; ограничитель концов рабочего участка рельсового пути при передвижении козлового крана – осуществляет ограничение пути крана конечным выключателем типа КУ-701; блокировка двери кабины – препятствует включению козлового крана в работу при открытой двери кабины, осуществляется конечным выключателем ВПК-1110.

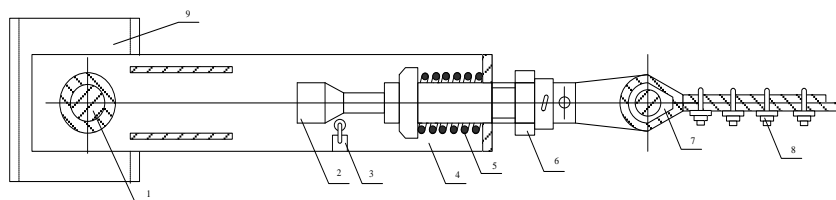


Рисунок 6,1 – Крепление конца каната на барабане грузовой лебёдки

(1 – ось на балке ригеля; 2 – регулирующий винт настройки конечного выключателя(толкатель); 3 – конечный выключатель; 4 – корпус; 5 – пружина; 6 – гайка нажатия пружины; 7 – коуш; 8 – зажим винтовой; 9 – торцевая балка ригеля; 10 – барабан грузовой лебёдки)

Нулевая блокировка (блокировка от самопуска электродвигателей) – препятствует включению двигателей в работу после выхода из аварийной ситуации или ремонта, если контроллеры не установлены в нулевое положение, осуществляется при помощи нулевых контактов контроллеров КГ-К10, КД-К10, КТ-К12, включенных в цепь питания катушки главного контактора.

При превышении на 10% установленной грузоподъёмности козлового крана пружина ограничителя грузоподъёмности сжимается, происходит срабатывание выключателя и отключается контактор-реверса движения «Подъём» - ПВ1. Ограничение концов рабочего участка передвижения тележки осуществляется конечным выключателем типа ВУ-250М или двумя путевыми выключателями типа ВПК-1110. Конечный выключатель соединён с валом лебёдки передвижения тележки. При повороте барабана лебёдки на определённое количество оборотов, что соответствует крайнему положению лебёдки: «вперёд» или «назад», происходит срабатывание конечного выключателя, контакт «ВК1-1» или «ВК2-1» размыкается и включается контактор защитной панели.

Блокировка двери кабины, препятствующая работе на козловом кране при открытой двери осуществляется конечным выключателем «ВК4» (типа ВПК-1110). Контакт конечного выключателя «ВК4» включен в цепь питания катушки контактора защитной панели. При открытой двери, контакт «ВК4»

разомкнут и работать на кране невозможно. Таким образом, приборами безопасности для козлового крана являются: ограничители грузоподъёмности, конечные выключатели для крайнего положения траверсы и выключатели для ограничения конца рабочего пути, выключатель блокировки двери кабины.

6.3.1 Средства защиты от поражения электрическим током.

Средства защиты от поражения электрическим током согласно [2], делятся на основные и дополнительные. Основные изолирующие электрозащитные средства обладают изоляцией, способной выдерживать рабочее напряжение установки, поэтому ими разрешается касаться токоведущих частей, находящихся под напряжением. К основным средствам защиты от поражения электрическим током относятся:

в электроустановках до 1000В: диэлектрические перчатки; изолирующие штанги; изолирующие и электроизмерительные клещи; слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками; указатели напряжения;

К дополнительным средствам защиты до 1000В относятся: диэлектрические галоши; диэлектрические ковры; изолирующие подставки.

6.3.2 Защитное заземление

В качестве защитного средства от поражения электротоком также применяется защитное заземление. Цель защитного заземления – снизить до безопасной величины напряжение на металлических частях оборудования, нормально не находящихся под напряжением, но могущих оказаться под напряжением вследствие нарушения изоляции электроустановок. Все металлические нетокведущие части электрооборудования крана: корпуса электродвигателей, контроллеров, конечных выключателей и остальной аппаратуры, а также металлические трубы электропроводок заземляются на металлическую конструкцию крана. Заземление осуществляется перемычками из гибкого медного провода. Для заземления металлоконструкции крана

рельсовые пути должны быть заземлены на собственный контур заземления не более 4 Ома (для установок до 1000В). Для выполнения этого условия выполним расчёт заземления. Расчёт заземления сводится к определению длины горизонтального заземлителя (обвязка) и числа вертикальных заземлителей (стержней) при заданных условиях.

6.4 Экологическая безопасность

Рабочий механизм содержит огромное количество компонентов, которые содержат вредные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся: свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему); никель и цинк (могут вызывать дерматит); щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу).

Поэтому электродвигатель требует специальных комплексных методов утилизации. В этот комплекс мероприятий входят [12]: отделение металлических частей от неметаллических; металлические части переплавляются для последующего производства; неметаллические части подвергаются специально переработке.

6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

5.1.1. Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

Согласно ГОСТ Р 22.0.02-94 ЧС - это нарушение нормальных условий жизни и деятельности людей на объекте или определенной территории (акватории), вызванное аварией, катастрофой, стихийным или экологическим бедствием, эпидемией, эпизоотией (болезнь животных), эпифитотией (поражение растений), применением возможным противником современных

средств поражения и приведшее или могущее привести к людским или материальным потерям".

С точки зрения выполнения проекта характерны следующие виды ЧС:

1. Пожары, взрывы;
2. Внезапное обрушение зданий, сооружений;
3. Геофизические опасные явления (землетрясения);

Метеорологические и агрометеорологические опасные явления

5.1.2. Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении исследований и обоснование мероприятий по предотвращению ЧС

1 При возникновении на кране опасных факторов, которые могут вызвать аварию или несчастный случай (трещины в металлоконструкциях, повреждение каната, поломка осей колес и других элементов, неисправность механизмов, тормозов, электрооборудования и др.), а также при появлении треска, биения, стука, грохота в механизмах . Немедленно прекратить перемещение груза, подать предупредительный звуковой сигнал, опустить груз на землю (пол, площадку) и выяснить причину аварийной ситуации.

2. Если элементы крана оказались под напряжением, крановщик должен принять меры личной безопасности, предусмотренные производственной инструкцией.

3. При возникновении на кране пожара нужно немедленно прекратить работу, отключить рубильник питающей сети, вызвать пожарную охрану и приступить к тушению пожара, пользуясь имеющимися на кране средствами пожаротушения.

4. При возникновении стихийных природных явлений (ураган, землетрясение и т.п.) прекратить работу, опустить груз на землю, площадку или перекрытие, покинуть кран и уйти в безопасное место.

5. При уgone крана ветром крановщик должен принять меры к его остановке в соответствии с указаниями, изложенными в руководстве по эксплуатации крана (применение противовключения и др.), отключить электропитание, покинуть кран и закрепить его всеми имеющимися противоугонными средствами, в том числе с применением специальных башмаков.

6. При возникновении угрозы разрушения перекрытий или стен здания, крановых путей или подкрановых балок .немедленно прекратить работу, остановить и обесточить кран и покинуть пределы опасной зоны.

7. При возникновении других аварийных ситуаций крановщик должен выполнить требования безопасности, изложенные в руководстве по эксплуатации крана.

8. Если во время работы крана произошли авария или несчастный случай, крановщик должен немедленно поставить в известность лицо, ответственное за безопасное производство работ кранами, и обеспечить сохранность обстановки аварии или несчастного случая, если это не представляет опасности для жизни и здоровья людей.

9. Обо всех аварийных ситуациях крановщик обязан сделать запись в вахтенном журнале и поставить в известность инженерно-технического работника, ответственного за содержание грузоподъемных машин в исправном состоянии.

6.5.1 Пожарная безопасность

Пожароопасными называются установки, в которых применяются или хранятся горючие вещества.

Согласно классификации кран относится к классу П-111 (расположена в не помещения, в зоне в которой обращаются горючие жидкости с t вспышки 61°C и выше или в зоне, где хранятся твердые горючие вещества) [9].

Для обеспечения безопасности при пожаре на кране - перегружателе предусмотрены:

- система оповещения о пожаре;
- система автоматической пожарной сигнализации;
- первичные средства пожаротушения.

Возгорания, пожары и воспламенения часто сопровождаются взрывами и могут быть очень опасными для людей. Поэтому пожарная безопасность является одним из важнейших разделов охраны труда на производстве. Существенную роль в профилактике и предотвращении пожаров играет

правильный выбор режима работы электрооборудования с учетом класса размещения по пожароопасности.

Пожарная безопасность должна обеспечиваться: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями.

Автоматические установки пожаротушения и установки пожарной сигнализации должны удовлетворять требованиям проектной документации и отраслевым стандартам. Применяемые на кране переносные углекислотные огнетушители ОУ-5 должны иметь бирки и маркировки и должны быть окрашены в красный цвет. Перезарядка огнетушителей выполняется в соответствии с инструкцией по безопасности. Огнетушители должны располагаться в заметных и легкодоступных местах и подлежат периодическому обслуживанию, включающему в себя следующее:

- очистка от пыли и грязи;
- восстановление окраски и соответствующих подписей.

Для курения должны быть отведены специальные места, оборудованные средствами пожаротушения, и предусматривающие возможные способы эвакуации людей и оборудования.

При поступлении сигнала противопожарной сигнализации машинист обязан произвести остановку работы, попытаться обесточить кран и приступить к тушению пожара. Если эти действия невозможны из-за сложности пожара, то ему необходимо покинуть рабочее место (кран), уйти в специально отведенное место и сообщить о случившемся старшему смены (бригадиру) и ждать дальнейших указаний.

Заключение

В представленной ВКР был рассчитан и спроектирован регулируемый электропривод перемещения тележки козлового крана на основе системы ПЧ-АД с векторным управлением. На основе заданных максимальных значения массы перемещаемого груза и скорости перемещения тележки крана, был произведен выбор мощности асинхронного двигателя 4A200L4УЗ. Затем был произведен выбор преобразователя частоты с векторным управлением – VLT5032 «Danfoss».

Рассчитаны параметры схемы замещения двигателя, механические и электромеханические характеристики разомкнутой системы преобразователь частоты – двигатель. На основе полученных характеристик была произведена проверка обеспечения заданной области работы электропривода, проверка правильности выбора двигателя, проверка правильности выбора преобразователя частоты.

Далее на основе схемы замещения и структурной схемы линеаризованной системы автоматического управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением была выполнена оптимизация имеющихся в системе управления контуров и на основе структурных схем выполнено моделирование САУ в среде MatLAB Simulink.

По итогам оптимизации и моделирования можно сказать, что линеаризованная САУ полностью выполняет требования технического задания.

При выполнении моделирования нелинейной САУ были учтены основные нелинейности элементов системы управления электропривода. Оказалось, что нелинейная система не позволяет полностью обеспечить требования технического задания, поэтому следует сделать вывод о значительном влиянии нелинейности на работу систем управления переменного тока.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» выполнен технический проект и решены следующие задачи:

- в результате проведения SWOT-анализа были выявлены сильные и слабые стороны выбора технического проекта. Установлено, что технический проект имеет несколько важных преимуществ, обеспечивающих повышение производительности, безопасности экономичности технического производства.
- при планировании технических работ был разработан график занятости для двух исполнителей, составлена ленточная диаграмма Ганта, позволяющая оптимально скоординировать работу исполнителя.
- составление сметы технического проекта позволило оценить первоначальную сумму затрат на реализацию технического проекта.
- оценка ресурсоэффективности проекта, проведенная по интегральному показателю, дала высокий результат (4,6 по 5-балльной шкале), что говорит об эффективности реализации технического проекта.

В разделе «Социальная ответственность» произведен анализ опасных и вредных факторов на предприятии, техника безопасности, производственная санитария и пожарная безопасность.

Conclusion

An adjustable electric drive of the gantry crane truck carriage based on the vector-controlled IF-AD system is calculated and designed. Based on the set maximum values of the mass of the cargo being moved and the speed of the crane carriage, the power of the induction motor 4A200L4UZ was selected. Then the choice of frequency converter with vector control - VLT5032 "Danfoss" was made.

The parameters of the motor replacement circuit, mechanical and electromechanical characteristics of the open system, frequency converter - motor are calculated. Based on the received characteristics, a check was made to ensure the specified area of operation of the electric drive, checking the correctness of the motor selection, checking the correctness of the selection of the frequency converter.

Further on, based on the substitution scheme and the structural scheme of the linearized system for automatic control of a frequency-controlled asynchronous electric drive with vector control, optimization of the contours available in the control system was carried out and modeling of the ACS in the MatLAB Simulink environment was performed on the basis of the structural schemes.

Based on the results of optimization and modeling, it can be said that the linearized ACS completely fulfills the requirements of the technical assignment.

When performing the simulation of the nonlinear automatic control system, the main nonlinearities of the control system elements of the electric drive were taken into account. It turned out that the non-linear system does not allow to fully satisfy the requirements of the technical specification, therefore, it should be concluded that the nonlinearity has a significant effect on the operation of AC control systems.

Перечень использованных источников

1. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н., Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов, М.:Академия, 2004.
2. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Под общ. ред. Копылова И.П. Т.1. М., «Энергоатомиздат», 1988
3. Москаленко В.П. Электрический привод. М., «Высшая школа», 2000.
4. Ланграф С.В., Асинхронный электропривод, ТПУ Томск, 2003 г.
5. Фираго Б.И., Павлячик Л. КПД асинхронного электродвигателя при частотном управлении с различными видами нагрузок//Изв. ВУЗов и энерг. объедин. СНГ. Энергетика. 2001. №3. С 52 –59.
6. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. – Электричество, 1998.
7. Чернышев А. Ю., Ланграф С. В., Чернышев И. А. Исследование систем «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»: Методические указания. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. – 24с.
8. Чернышев А. Ю., Ланграф С. В., Чернышев И. А. Исследование систем скалярного частотного управления асинхронным двигателем: Методические указания. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. – 23с.
9. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
10. Яуре А. Г., Певзнер Е.М., Крановый электропривод, справочник, – М.:Энергоатомиздат, 1988 – 342с.: ил.

- 11.Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами,под ред. Круповича, Москва, Энергоатомиздат, 1982г.;
- 12.Безопасность жизнедеятельности./ Под ред. С.В. Белов. – М.: Высш. шк., 1999. – 448 с.
- 13.Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник/ Под ред. А.Н.Баратова –М.: Энергия, 1987.
- 14.Правила устройства электроустановок, М.: Энергоатомиздат,1999.
- 15.Алиев И.И. Электротехнический справочник. – 4-е изд., испр. – М.: ИП РадиоСофт, 2002. – 384 с.
- 16.А.И. Ильин «Экономика предприятия» 2 издание. Новое издание, 2008г.
- 17.Н.И. Королёва. Организация производства на предприятии: Учебное пособие. Томск Издание ТПУ, 2005г.
- 18.Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
- 19.Коршунова Л. А., Кузьмина Н. Г. Техничко-экономическое обоснование инновационного проекта. Методические указания по выполнению экономического раздела ВКР для студентов энергетических специальностей всех форм обучения. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012.
20. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
21. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
22. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

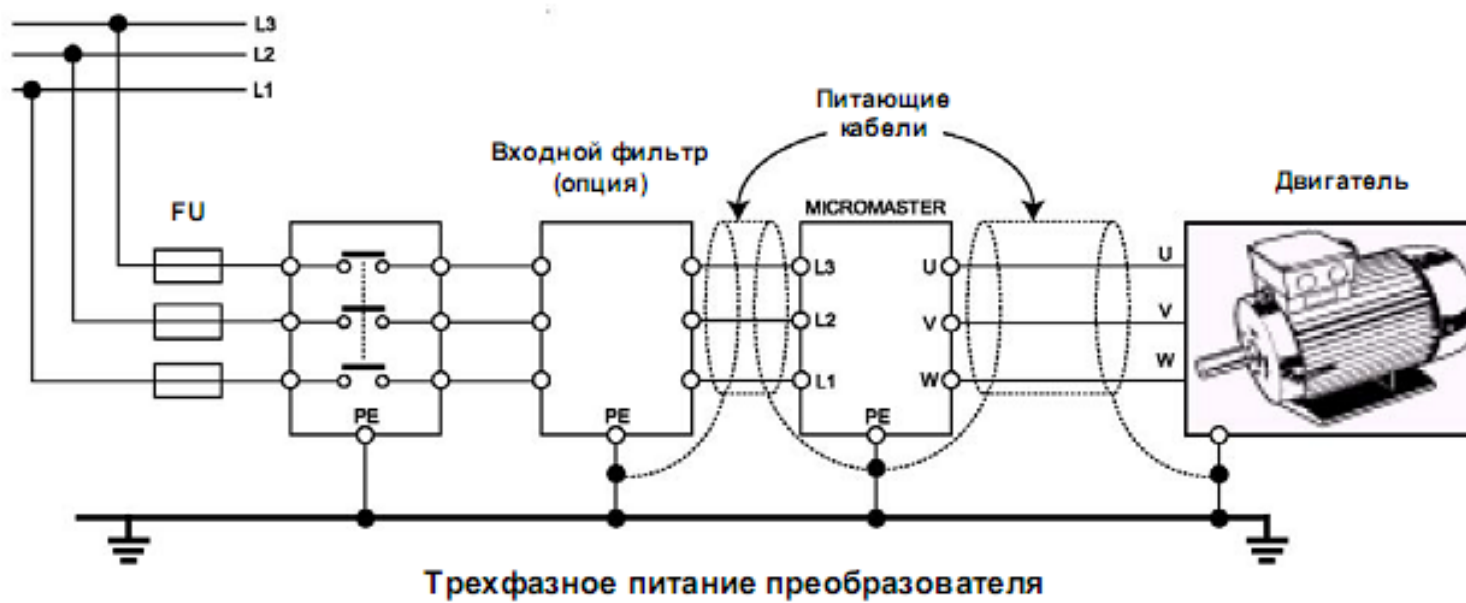
Приложение А

Графический материал

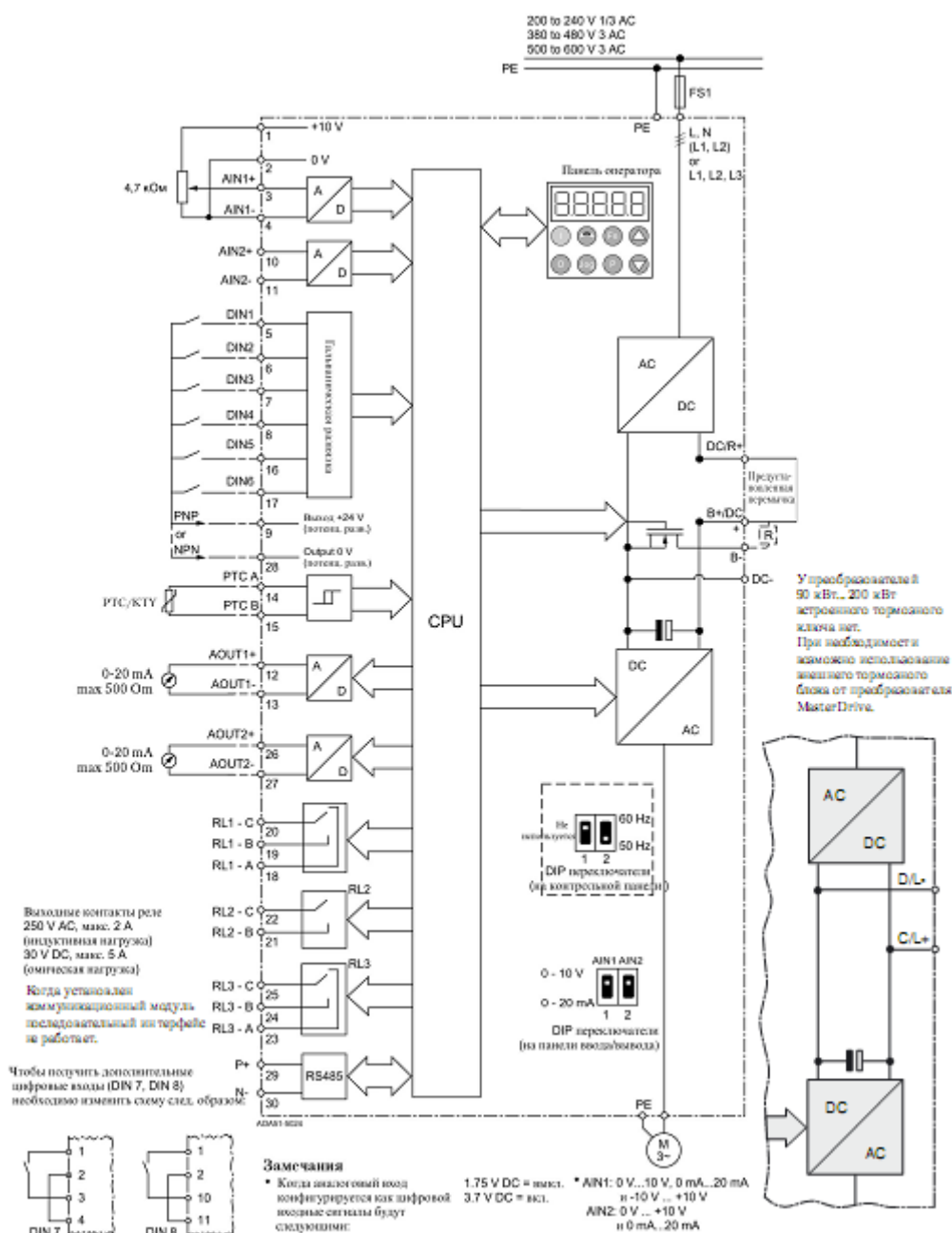
Козловой кран



Функциональная схема



Принципиальная схема преобразователя.



Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

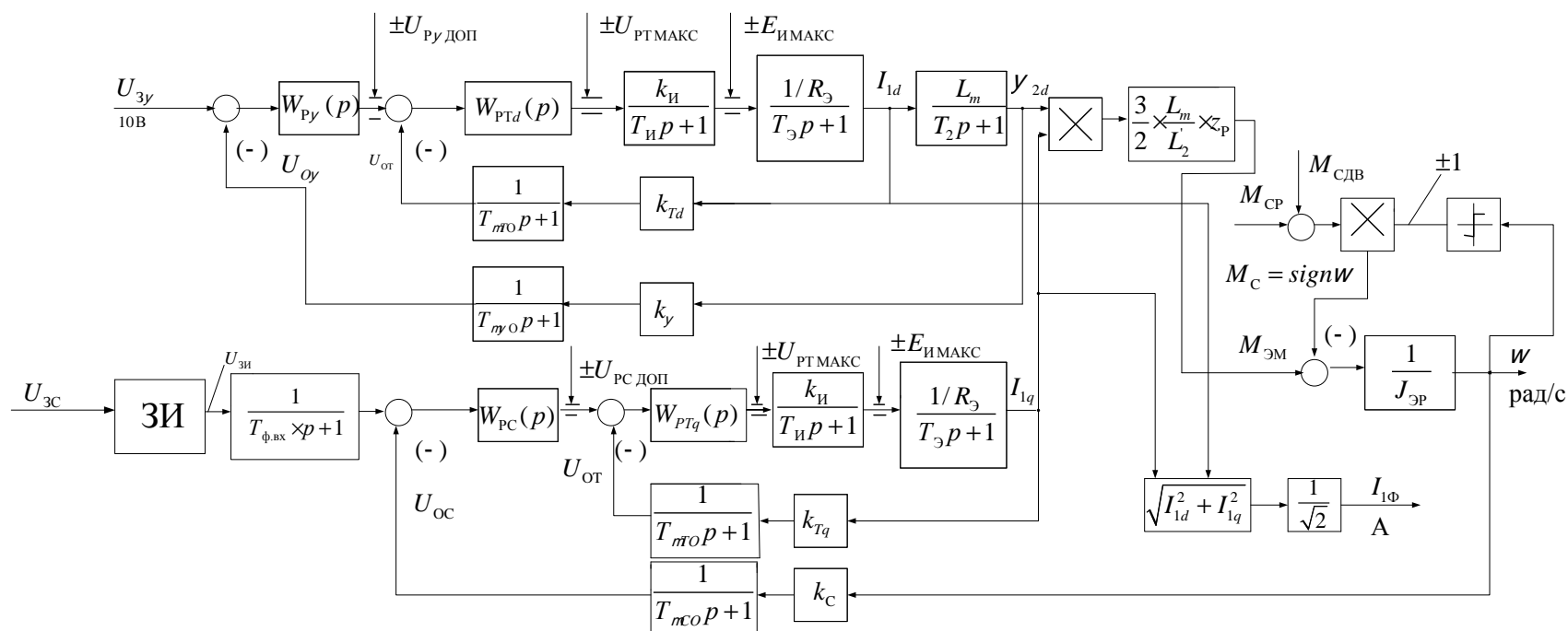
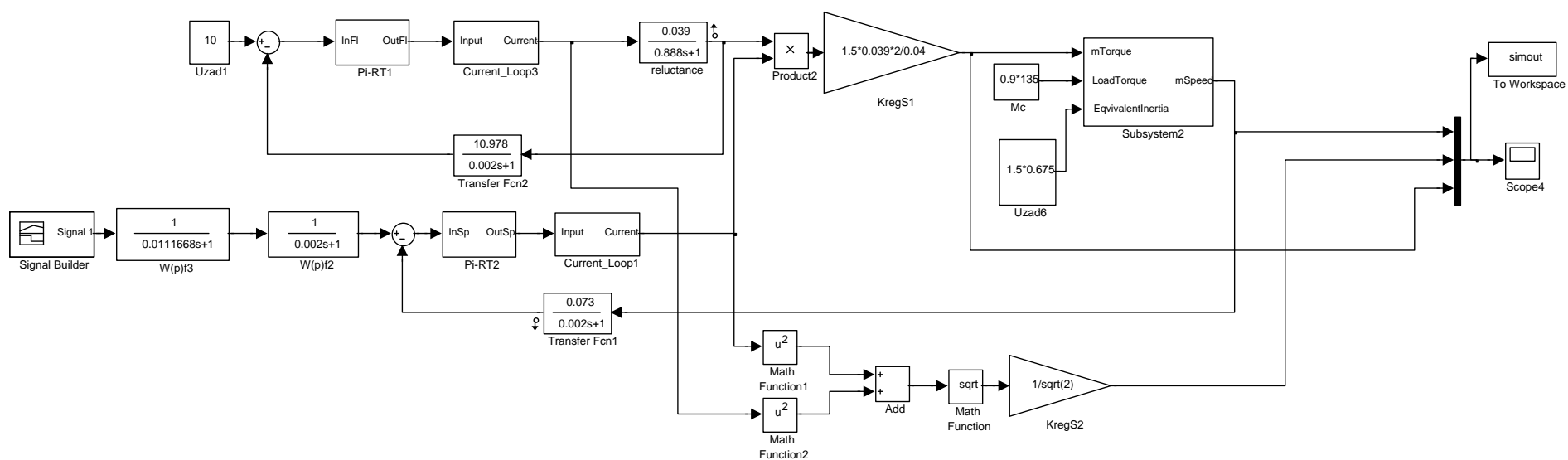
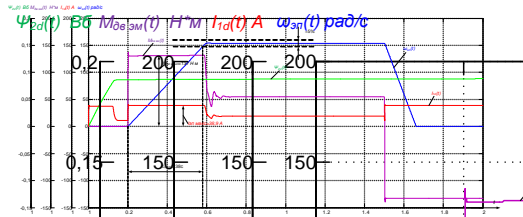


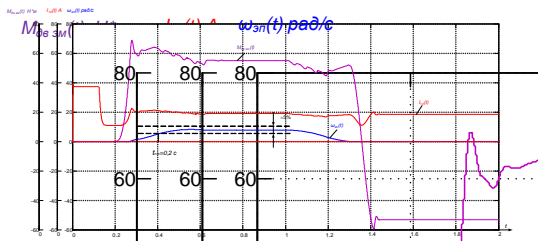
Схема имитационной модели в программной среде *MATLAB*



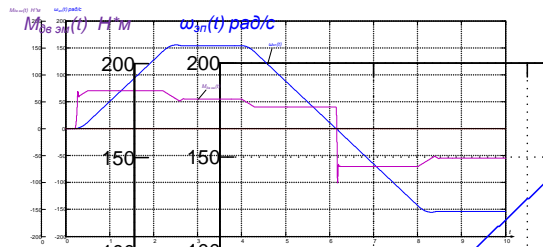
Демонстрационный лист



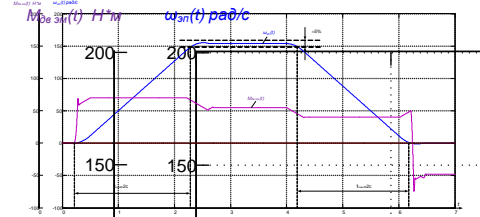
Переходная характеристика пуска на максимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$



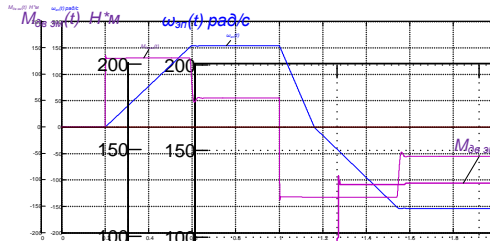
Переходная характеристика пуска на минимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с задатчиком интенсивности.



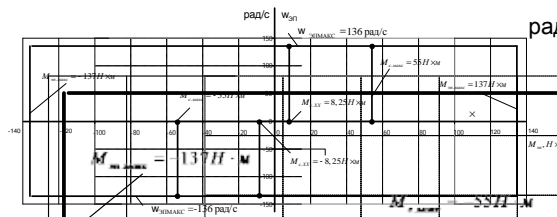
Переходная характеристика реверса на максимальную скорость нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с задатчиком интенсивности.



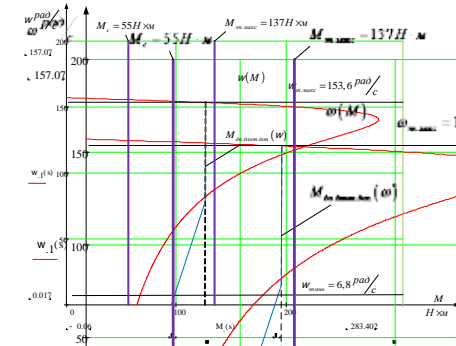
Переходная характеристика пуска на максимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с задатчиком интенсивности.



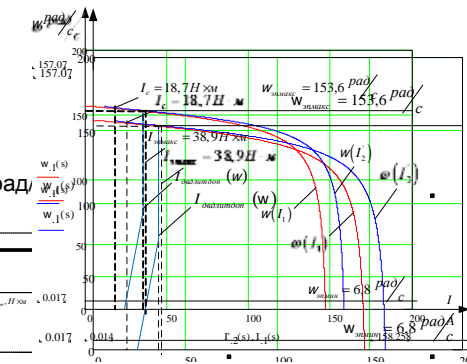
Переходная характеристика реверса на максимальную скорость нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с.



Заданная область работы электропривода



Области работы электропривода в плоскости механических характеристик двигателя



Области работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя